

Aplicación de un índice de seguridad inherente para definir el nivel de riesgo químico: Caso de estudio en un laboratorio de investigación de un centro universitario

Application of an inherent safety index to define the level of chemical risk: Case study in a research laboratory of a university center







Joel Barrantes-Guzmán¹, Fernanda Barrantes-Rojas²,
Fiorella Camacho-Rojas³, Gloriana Obando-Santamaría⁴,
Nidia Quesada-García⁵, José Carlos Mora-Barrantes⁶

Fecha de recepción: 18 de febrero de 2021

Fecha de aprobación: 7 de junio de 2021

Barrantes-Guzmán, J; Barrantes-Rojas, F; Camacho-Rojas, F; Obando-Santamaría, G; Quesada-García, N; Mora-Barrantes, J.C. Aplicación de un índice de seguridad inherente para definir el nivel de riesgo químico: caso de estudio en un laboratorio de investigación de un centro universitario. *Tecnología en Marcha*. Vol. 35-2. Abril-Junio 2022. Pág 76-92.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v35i2.5627>

- 1 Escuela de Química. Universidad Nacional. Sede Interuniversitaria, Alajuela, Costa Rica. Correo electrónico: joel.barrantes.guzman@est.una.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-5803-0232>
- 2 Escuela de Química. Universidad Nacional. Sede Interuniversitaria, Alajuela, Costa Rica. Correo: maria.barrantes.rojas@est.una.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0001-6247-6811>
- 3 Escuela de Química. Universidad Nacional. Sede Interuniversitaria, Alajuela, Costa Rica. Correo electrónico: fiorella.camacho.rojas@est.una.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0003-1741-5520>
- 4 Escuela de Química. Universidad Nacional. Sede Interuniversitaria, Alajuela, Costa Rica. Correo electrónico: gloriana.obando.santamaria@est.una.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0003-1279-5026>
- 5 Escuela de Química. Universidad Nacional. Sede Interuniversitaria, Alajuela, Costa Rica. Correo electrónico: nidia.quesada.garcia@est.una.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-9912-3355>
- 6 Laboratorio de Química de la Atmósfera, Escuela de Química. Universidad Nacional. Heredia, Costa Rica. Correo electrónico: jose.mora.barrantes@una.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-0409-5276>



Palabras clave

Seguridad inherente; riesgo químico; laboratorio; peligro químico; índice.

Resumen

La metodología de seguridad inherente (SI) permite evitar o eliminar los peligros tanto en industrias como en laboratorios experimentales mediante la evaluación del riesgo químico. Esta metodología contempla el adecuado funcionamiento tanto en condiciones óptimas de trabajo como extremas, incluyendo parámetros fisicoquímicos y toxicológicos para asegurar la fiabilidad del proceso químico y obtener como resultado un índice de seguridad inherente. En la presente investigación se evaluó un total de 22 prácticas de laboratorio con una cantidad de 76 reactivos químicos con el objetivo de definir el nivel de riesgo químico de un manual de laboratorio de investigación de un centro universitario, mediante la aplicación de un índice de riesgo de seguridad inherente, para la prevención de los riesgos hacia la salud de las personas y el medio ambiente. Se obtuvo como resultado un índice de seguridad inherente al producto químico experimental de 19 para la práctica “Determinación de oxígeno, nitrógeno, monóxido de carbono, dióxido de carbono y metano por cromatografía de gases”, siendo este el valor máximo de riesgo químico presente en el manual de laboratorio. El valor obtenido se encuentra muy cercano al valor de seguridad inherente teórico (24), por lo que se considera una práctica riesgosa.

Keywords

Inherent safety; chemical risk; laboratory; chemical hazard; index.

Abstract

The inherent safety methodology (IS) makes an analysis to try to avoid or eliminate hazards both in industries and in experimental laboratories by the evaluation of chemical risk. This methodology contemplates the adequate operation either in optimal or extreme working conditions, including physicochemical and toxicological parameters to ensure the reliability of the chemical process and to obtain an inherent safety index as a result. In this investigation, a total of 22 laboratory practices were evaluated with 76 chemical reagents with the aim of defining the level of chemical risk of a research laboratory manual of a university center, by applying an inherent safety risk index for the prevention of risks to human health and the environment. The result was an inherent safety index for the experimental chemical of 19 for the practice “Determination of oxygen, nitrogen, carbon monoxide, carbon dioxide and methane by gas chromatography”, this being the maximum core of chemical risk in the laboratory. The value obtained is very close to the theoretical inherent safety value (24), thus it is considered a risky practice.

Introducción

A nivel local, Costa Rica presentaba una problemática vinculada a la carencia de normativas e instituciones relacionadas con la seguridad en industrias químicas y salud ocupacional; como respuesta ante esta necesidad surgen nuevos enfoques y organizaciones como: el Consejo de Seguridad Ocupacional (CSO) cuyo objetivo es establecer mejores condiciones laborales, la Comisión Nacional de Emergencias (CNE) con su plan de gestión de riesgos, la Dirección de Gestión de Calidad Ambiental (DIGECA) con su política nacional de seguridad química, Bomberos de Costa Rica con la aplicación de NFPA y colaboración en incidentes

de índole química, el Instituto Nacional de Seguros (INS), entre otras, que buscan disminuir la probabilidad de incidencia de riesgos químicos y con ello, aumentar la seguridad de los colaboradores [1], [2], [3], [4].

El peligro se relaciona al daño que puede originar un agente químico debido a sus propiedades fisicoquímicas y toxicológicas, según su clasificación: misceláneos, corrosivos, tóxicos, inflamables, explosivos, comburentes y radioactivos. Por otra parte, se habla de riesgo químico cuando un trabajador está expuesto a productos peligrosos y existe la posibilidad de sufrir un determinado daño debido a la frecuencia de esa exposición [5], [6], [7].

La evaluación del riesgo químico consta de una serie de etapas generales para su desarrollo. La primera etapa es la identificación de peligros, la cual permite obtener información referente a los agentes químicos presentes en el lugar de trabajo, así como las variables asociadas a estas sustancias: propiedades fisicoquímicas, toxicológicas y las condiciones de operación de las sustancias químicas. La segunda etapa corresponde a la estimación de riesgo durante los procesos de: almacenamiento, gases a presión y generación de residuos peligrosos. La tercera etapa incluye el estudio de los factores de riesgo que interfieren en la formación de: reacciones químicas peligrosas, incendios, explosiones, entre otras. La etapa final corresponde a la jerarquización de riesgos, cuyo objetivo es establecer un orden de prioridad para la evaluación de las situaciones de riesgo en función de las vías de exposición ante los agentes químicos (inhalación, absorción a través de la piel, contacto con la piel y ojos) [8].

La gestión del riesgo químico ha incentivado el desarrollo de diversas estrategias y metodologías, considerando diferentes variables, que permitan procesos más seguros de trabajo tanto para la salud de los usuarios como para el medio ambiente. Algunos ejemplos son el método INR, COSHH Essentials, Stoffenmanager, REGETOX, KjemiRisk, entre otros [9].

Existe una metodología vinculada a la seguridad inherente (SI) en el diseño de procesos que considera las propiedades intrínsecas de las sustancias. Este método, busca erradicar y prevenir los peligros; sus principios básicos se basan en: intensificación, sustitución de recursos, atenuación, simplificación y limitación de efectos; los cuales a su vez se fundamentan en la evaluación de la sostenibilidad, desarrollando métodos orientados en actividades con menor cantidad de tóxicos o contaminantes [10], [11], [12], [13], [14].

La evaluación de la SI contempla el adecuado funcionamiento del sistema tanto en condiciones óptimas de trabajo como extremas, para asegurar la fiabilidad del proceso químico. En la aplicación de esta metodología se considera parámetros como: el control de inventario de sustancias químicas, disposición y compra de equipos de protección, instalaciones y variables operativas (presión, temperatura e interacción de las sustancias) [10], [15].

El índice de seguridad inherente se compone de dos variables o subíndices, el subíndice de riesgos para la salud y de peligros físicos/químicos y el subíndice de procesos [16]. Estos dos subíndices se dividen en más parámetros y se relacionan con: la toxicología (capacidad de absorción en el cuerpo humano), la naturaleza química de las sustancias (explosividad, reactividad e inflamabilidad) y la etapa productiva (temperatura, presión, rendimiento, conversión e inventario) [10], [17].

El objetivo general de la investigación fue definir el nivel de riesgo químico de un manual de laboratorio de investigación de un centro universitario, mediante la aplicación de un índice de riesgo de seguridad inherente, para la prevención de los riesgos hacia la salud de las personas y el medio ambiente.

Metodología

En el presente trabajo de investigación se evaluó el riesgo químico de los reactivos utilizados en las prácticas del manual de Laboratorio de Química de la Atmósfera de la Universidad Nacional de Costa (LAQAT-UNA). El manual consta de un total de 22 prácticas que describen métodos analíticos para la determinación de la concentración de contaminantes en el aire [18].

La categorización del riesgo químico se realizó mediante la metodología del Índice de Seguridad Inherente (I_{TI}), descrito por Heikkilä. Para el estudio se recolectaron parámetros de las sustancias químicas relacionados con sus propiedades fisicoquímicas y toxicológicas, tales como: entalpía de reacción, interacción química, inflamabilidad, explosividad, toxicidad y corrosividad. Los parámetros fisicoquímicos y toxicológicos de las sustancias analizadas fueron obtenidos principalmente de las hojas de seguridad química (Material Safety Data Sheet “MSDS”) consultadas en las siguientes bases de datos: Fisher, Carl Roth, Merck y Sigma Aldrich [19], [20], [21]. Estos parámetros fueron interpretados en el método como subíndices, permitiendo obtener el valor del riesgo total para cada reactivo químico, de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$I_{TI} = I_{CI} + I_{PI} \quad (\text{fórmula 1})$$

Donde:

I_{TI} : Índice de seguridad inherente total.

I_{CI} : Índice de seguridad inherente al producto químico.

I_{PI} : Índice de seguridad inherente al proceso.

El valor del riesgo para cada sustancia química se obtuvo por medio de la sumatoria de los índices descritos anteriormente, cada producto químico se evaluó en función a las características fisicoquímicas y toxicológicas de las sustancias, detalles de estructura y equipo utilizado en el laboratorio.

Índice de seguridad inherente al producto químico (I_{CI})

El índice de seguridad inherente al producto químico lo conforman los siguientes subíndices: calor de reacción ($I_{\Delta H}$), interacción química (I_{NT}), inflamabilidad (I_{FL}), explosividad (I_{EX}), exposición tóxica (I_{TOX}) y corrosividad (I_{COR}).

Para el cálculo del índice de calor de reacción ($I_{\Delta H}$) se utilizó las entalpías de formación estándar ($\Delta^{\circ}H_f$) recopiladas de las bases de datos del NIST [22] para las sustancias químicas evaluadas. El valor del $I_{\Delta H}$ se obtuvo de acuerdo con el cuadro 1.

Cuadro 1. Determinación del subíndice del calor de reacción ($I_{\Delta H}$).

Calor de reacción / masa de reacción total	Puntuación
Térmicamente neutro ≤ 200 J/g	0
Ligeramente exotérmico <600 J/g	1
Moderadamente exotérmico <1200 J/g	2
Fuertemente exotérmico <3000 J/g	3
Extremadamente exotérmico ≥ 3000 J/g	4

En lo que respecta al subíndice de interacción química (I_{INT}), este se determinó con la información obtenida de las hojas de seguridad (frases H, estabilidad y reactividad de las sustancias) y se asignaron los valores de acuerdo con el cuadro 2.

Cuadro 2. Determinación del subíndice de interacción química (I_{INT}).

Interacción química	Puntuación del I_{INT}	Interacción química	Puntuación del I_{INT}
Formación de calor	1 – 3	Formación de gases inflamables	2 – 3
Fuego	4	Explosión	4
Formación de gas inofensivo, no inflamable	1	Polimerización rápida	2 – 3
Formación de gases tóxicos	2 – 3	Químicos tóxicos solubles	1

Fuente: A. Heikkilä, 1999.

Para el subíndice de inflamabilidad (I_{FL}), se clasificaron los compuestos según el valor de los puntos de inflamación y ebullición obtenidos de las hojas de seguridad de los reactivos. El valor del subíndice se determinó de acuerdo con el cuadro 3.

Cuadro 3. Determinación del subíndice de inflamabilidad (I_{FL}).

Inflamabilidad	Puntuación del I_{FL}	Inflamabilidad	Puntuación del I_{FL}
No es inflamable	0	Fácilmente inflamable (punto de inflamación < 21°C)	3
Combustible (punto de inflamación > 55°C)	1	Muy inflamable (punto de inflamación < 0°C y punto de ebullición ≤ 35°C)	4
Inflamable (punto de inflamación ≤ 55°C)	2	N/A	N/A

Nota: N/A = No aplica. Fuente: A. Heikkilä, 1999.

Para determinar el subíndice de explosividad (I_{EX}), se utilizaron los límites inferiores y superiores de explosividad de cada compuesto químico, estos límites se obtuvieron de las hojas de seguridad de las sustancias químicas. El valor del subíndice se obtuvo de acuerdo con el cuadro 4.

Cuadro 4. Determinación del subíndice de explosividad (I_{EX}).

Explosividad (UEL-LEL) vol %	Puntuación de I_{EX}	Explosividad (UEL-LEL) vol %	Puntuación de I_{EX}
No explosivo	0	45 – 70	3
0 – 20	1	70 – 100	4
20 – 45	2	N/A	N/A

Para la determinación del subíndice de exposición tóxica (I_{TOX}) de cada producto químico, se utilizaron los valores de límites umbrales (TLV) obtenidos de las hojas de seguridad de las sustancias y se compararon los criterios y resultados obtenidos a partir del cuadro 5.

Cuadro 5. Determinación del subíndice de exposición tóxica (I_{TOX}).

Límite tóxico (ppm)	Puntuación de I_{TOX}	Límite tóxico (ppm)	Puntuación de I_{TOX}
TLV > 10000	0	TLV ≤ 10	4
TLV ≤ 10000	1	TLV ≤ 1	5
TLV ≤ 1000	2	TLV ≤ 0.1	6
TLV ≤ 100	3	N/A	N/A

Nota: N/A = No aplica. Fuente: A. Heikkilä, 1999.

Para la determinación del subíndice de corrosividad (I_{COR}) de los productos químicos, se tomó en consideración el material del recipiente en el cual se almacenan. Para el caso de los reactivos químicos almacenados en recipientes de vidrio o plástico, se asignó un valor del índice de cero, mientras que, las sustancias almacenadas en recipientes metálicos se les asignó un valor de 1.

El valor total del riesgo asociado a este índice se obtiene de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$I_{CI} = I_{\Delta H} + I_{INT,max} + (I_{FL} + I_{EX} + I_{TOX})_{max} + I_{COR,max} \quad (\text{fórmula 2})$$

Donde:

max: puntuación experimental máxima.

$I_{\Delta H}$: subíndice de calor de reacción.

$I_{INT,max}$: subíndice de interacción química.

$I_{FL,max}$: subíndice de inflamabilidad.

$I_{EX,max}$: subíndice de explosividad.

$I_{TOX,max}$: subíndice de toxicidad.

$I_{COR,max}$: subíndice de corrosividad.

El I_{CI} se obtiene de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$I_{CI} = I_{\Delta H} + I_{INT,max} + (I_{FL} + I_{EX} + I_{TOX})_{max} + I_{COR,max} \quad (\text{fórmula 3})$$

Donde:

max: puntuación teórica máxima

$I_{\Delta H}$: subíndice de calor de reacción.

$I_{INT,max}$: subíndice de interacción química igual 4.

$I_{EX,max}$: subíndice de explosividad igual 4.

$I_{TOX,max}$: subíndice de toxicidad igual a 6.

$I_{COR,max}$: subíndice de corrosividad igual a 2.

Índice de seguridad inherente al proceso (I_{PI})

El índice de seguridad inherente al producto proceso lo conforman los siguientes subíndices: inventario (I_I), temperatura del proceso (I_T), presión del proceso (I_P), equipo (I_{EQ}), estructura del proceso (I_{ST}).

Para la determinación de subíndice del inventario (I_i), se tomó en consideración la cantidad (t) de las sustancias almacenadas en el sitio de estudio. El método considera tanto el inventario en el área límite de la batería interna (ISBL) y el área límite de la batería externa (OSBL), es decir, la cantidad máxima de reactivo que se utiliza en un proceso unitario por hora. Para el caso del sitio de estudio, la máxima cantidad de reactivo utilizado no alcanza la tonelada, tanto para el ISBL como para el OSBL, por lo que se asignó un valor de cero para este subíndice (cuadro 6).

Cuadro 6. Determinación del subíndice del inventario (I_i).

Inventario		Puntuación de I_i	Inventario		Puntuación de I_i
ISBL	OSBL		ISBL	OSBL	
0-1 t	0-10 t	0	50-200 t	500-2000 t	3
1-10 t	10-100 t	1	200-500 t	2000-5000 t	4
10-50 t	100-500 t	2	500-1000 t	5000-10000 t	5

Fuente: A. Heikkilä, 1999.

El subíndice de temperatura del proceso (I_T), está determinado por el máximo de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) que puede alcanzar el área donde se desarrolla el proceso [10]. Para el sitio de estudio la temperatura máxima promedio es de 37°C [23]. El valor del subíndice se obtuvo como se muestra en el cuadro 7.

Cuadro 7. Determinación del subíndice de temperatura del proceso (I_T).

Temperatura del proceso	Puntuación de I_T	Temperatura del proceso	Puntuación de I_T
$< 0^{\circ}\text{C}$	1	$150-300^{\circ}\text{C}$	2
$0-70^{\circ}\text{C}$	0	$300-600^{\circ}\text{C}$	3
$70-150^{\circ}\text{C}$	1	$> 600^{\circ}\text{C}$	4

Fuente: A. Heikkilä, 1999.

El subíndice de presión del proceso (I_p), está determinado por la presión máxima (bar) que puede alcanzar el área de trabajo [10]. Para el sitio de estudio la presión máxima promedio es de 0,8884 bar [24]. El valor del subíndice se obtuvo como se muestra en el cuadro 8.

Cuadro 8. Determinación del subíndice de presión del proceso (I_p).

Presión del proceso	0.5-5 bar	0-0.5 o 5-25 bar	25-50 bar	50-200 bar	200-1000 bar
Puntuación I_p	0	1	2	3	4

Fuente: A. Heikkilä, 1999.

Para la determinación de los subíndices de seguridad referentes a la maquinaria (I_{EQ}), se consideró la peligrosidad asociada a las características del equipo utilizado en el ISBL y OSBL. La asignación de los valores del I_{EQ} se obtuvo según los cuadros 9 y 10.

Cuadro 9. Determinación del subíndice de equipo de seguridad del ISBL (I_{EQ}).

Equipos	Puntuación I_{EQ}
Equipos que manejan material no inflamable y tóxico.	0
Intercambiadores de calor, bombas, tambores, torres.	1
Enfriadores de aire, reactores, bombas del alto peligro.	2
Compresores, reactores con alto peligro.	3
Hornos, calentadores de fuego.	4

Fuente: A. Heikkilä, 1999.

Cuadro 10. Determinación del subíndice de equipo de seguridad del OSBL (I_{EQ}).

Equipos	Puntuación I_{EQ}
Equipos que manejan material no tóxico e inflamable.	0
Tanques a presión atmosférica para el almacenamiento de líquidos inflamables y bombas para líquidos inflamables y tóxicos.	1
Torres de enfriamiento, compresores, sistemas de purga, tanques de almacenamiento presurizados o refrigerados.	2
Antorchas, calentadores, hornos	3

Fuente: A. Heikkilä, 1999.

Finalmente, para la determinación del subíndice de estructura del proceso (I_{ST}), se evaluó la seguridad de los métodos en función de los registros de accidentes ocurridos en el lugar de trabajo. En el presente estudio, se consideró un valor global de 0 para todas las prácticas analizadas, con base en el cuadro 11.

Cuadro 11. Subíndice de estructura de proceso seguro I_{ST}

Nivel de seguridad de la estructura del proceso	Recomendado (estándar, seguridad, etc.)	Prácticas de ingeniería adecuadas	Sin información o neutral	Probablemente inseguro	Menores accidentes documentados	Mayores accidentes documentados
Puntuación de I_{ST}	0	1	2	3	4	5

Fuente: A. Heikkilä, 1999.

El valor total del riesgo asociado a este índice se obtiene de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$I_{PI} = I_I + I_{T,max} + I_{P,max} + I_{EQ,max} + I_{ST,max} \quad (\text{fórmula 4})$$

Donde:

max: puntuación experimental máxima.

I_i : subíndice de inventario.

$I_{T,max}$: subíndice de temperatura del proceso.

$I_{P,max}$: subíndice de presión del proceso.

$I_{EQ,max}$: subíndice de la maquinaria.

$I_{ST,max}$: subíndice de estructura del proceso.

Determinación del valor teórico máximo ($I_{TI\ TEO\ MAX}$) y valor teórico ($I_{TI\ TEO}$) del índice de seguridad inherente total

Para la determinación del valor teórico máximo del índice de seguridad inherente total se realizó la sumatoria de los valores teóricos máximos de los índices de seguridad inherente al producto químico ($I_{CI\ TEO\ MAX}$) y proceso ($I_{PI\ TEO\ MAX}$) según la fórmula 5.

$$I_{TI\ TEO\ MAX} = I_{CI\ TEO\ MAX} + I_{PI\ TEO\ MAX} \quad (\text{fórmula 5})$$

Donde:

max: puntuación experimental máxima.

$I_{CI\ TEO\ MAX}$: índice teórico de seguridad inherente al producto químico.

$I_{PI\ TEO\ MAX}$: índice teórico de seguridad inherente al proceso.

Para la determinación del valor teórico del índice de seguridad inherente total, según la fórmula 6, se realizó la sumatoria de los valores teóricos de los índices de seguridad inherente al producto químico ($I_{CI\ TEO}$) y no se contempló el índice al proceso ($I_{PI\ TEO}$) ya que no representa las condiciones de proceso reales a nivel de laboratorio.

$$I_{TI\ TEO} = I_{CI\ TEO} \quad (\text{fórmula 6})$$

Donde:

$I_{CI\ TEO}$: índice teórico de seguridad inherente al producto químico.

Resultados y discusión

Índice de seguridad inherente al producto químico (I_{CI})

En la presente investigación se evaluó mediante la metodología de seguridad inherente 22 prácticas de laboratorio con una cantidad de 76 reactivos químicos. En el cuadro 12 se presenta una muestra de los procedimientos analizados, a los cuales se les generó un código para nombrarlos con mayor facilidad, se indica además la cantidad total y ejemplos de reactivos utilizados por experimento.

Cuadro 12. Prácticas del manual de experimentos químicos del laboratorio LAQAT, Universidad Nacional.

Nombre de práctica	Código de la práctica	Cantidad de sustancias	Ejemplo de reactivos químicos analizados
Calibración de parámetros	CAP	0	-
Determinación de ácidos fuertes en aire)	DHA	3	Carbonato de sodio e isopropanol.
Determinación de óxidos de nitrógeno en la atmósfera	DNO	3	Cloruro de N-(1-naftil)-etilendiamina y ácido sulfanílico.
Determinación de amoníaco (Método del azul de indofenol)	DNH	12	Fenol y nitroprusiato de sodio.
Determinación de partículas totales en suspensión y PM10 método gravimétrico o de alto volumen	DPT	0	-
Determinación de hidrocarburos en la atmósfera	DHC	6	Diclorometano y ácido sulfúrico.
Muestreo y análisis de agua de lluvia	MAL	1	Ácido clorhídrico
Determinación de dióxido de azufre en la atmósfera	DSO	3	Ácido clorhídrico, sulfato de sodio.
Determinación de sulfuro de hidrógeno en la atmósfera	DHS	13	Diclorhidrato de N,N-dimetil-p-difenilendiamina y fostato de amonio.
Determinación de ozono en la atmósfera	DOA	12	Trióxido de arsénico y yodo molecular.
Análisis de aniones por HPLC	ACL	7	Ácido ftálico y cloruro de sodio.
Manejo del cromatógrafo de gases y su programa TURBOCHROM NAVIGATOR	GCT	2	Helio, hidrogeno
Muestreo y análisis de compuestos fenólicos en aire	AFA	6	Cloruro de amonio y fenol.
Determinación de mercapteno contenido en atmosférico	DMA	7	Ácido acético glacial y acetato de mercurio.
Determinación aldehídos en aire por medio de cartuchos de extracción en fase sólida	DAC	12	Formaldehido y carbón activado.
Muestreo de metano con bolsas TEDLAR	MMT	2	Helio e hidrogeno
Determinación de cloro libre contenido en la atmósfera	DCA	10	Cloroformo y ácido clorhídrico.
Determinación de oxígeno, nitrógeno, monóxido de carbono, dióxido de carbono y metano por cromatografía de gases	ONM	6	Estándar de calibración de nitrógeno y estándar de calibración de dióxido de carbono.
Determinación de calor de combustión en muestras de combustibles fósiles líquidos	CFL	2	Ácido benzoico y oxígeno.
Determinación de agua en productos de petróleo por destilación	DAP	1	Xileno.
Determinación de nitrógeno en aceites lubricantes por el método de Kjeldahl	DNK	9	Ácido bórico y óxido de mercurio (II).
Determinación de azufre y cloruros en combustibles	ACC	10	Ácido benzoico y bromuro de sodio.
Total		127	

*Nota aclaratoria: La sumatoria representada en el cuadro se refiere a la cantidad de sustancias totales por práctica, el dato real de sustancias utilizadas es de 76, ya que se repiten reactivos químicos.

El cuadro 13 contiene la tabulación de los datos experimentales recopilados para la práctica denominada “Determinación de hidrocarburos en la atmósfera”.

Cuadro 13. Propiedades fisicoquímicas de las sustancias utilizadas en la “Determinación de hidrocarburos en la atmósfera” para obtener los subíndices de seguridad inherente.

Sustancias	Masa Molar (g/mol)	ΔH formación (J/g)	Interacción química	P. Inflamabilidad (°C)	Rango de inflamabilidad/ Explosividad (%)	TLV (ppm)	Material de almacenamiento
Ácido sulfúrico	98,079	-8271,82	H290 / H314	NA	NA	0,04985777	Vidrio
Metanol	32,04	-7440,7	H225 / H301 / H311 / H331 / H370	12	6,0-31	200	Vidrio
Ácido nítrico	63, 01	-2749,25	H290, H314, EUH071	83	NA	2,02	Vidrio

NA: No aplica.

A partir de los datos obtenidos en el cuadro anterior, se determinó para cada sustancia química de cada procedimiento el índice de seguridad inherente al producto químico (I_{CI}) mediante la suma de los subíndices: $I_{\Delta H}$, I_{INT} , I_{FL} , I_{EX} , I_{TOX} y I_{COR} . En el cuadro 14, se observa los valores asignados para cada subíndice.

Cuadro 14. Determinación del I_{TI} a partir de los subíndices inherentes en la “Determinación de hidrocarburos en la atmósfera”.

Sustancia	$I_{\Delta H}$	I_{INT}	I_{FL}	I_{EX}	I_{TOX}	I_{COR}	I_{CI} reactivo químico	I_{CI} Exp	I_{PI}	I_{TI}
Ácido sulfúrico	4	3	0	0	6	0	13	13	0	13
Metanol	4	2	3	2	2	0	13			
Ácido nítrico	3	2	1	0	4	0	10			

De acuerdo con los datos del cuadro anterior, el ácido sulfúrico (H_2SO_4) y el metanol (CH_3OH) tienen un valor de 13, para el I_{CIEXP} , este resultado (13) obedece al riesgo de seguridad inherente al producto químico de la práctica.

En el cuadro 15 se muestran los valores de la seguridad inherente total obtenido para cada práctica evaluada en el sitio de estudio.

Cuadro 15. Índice de seguridad inherente para cada práctica del manual de laboratorio LAQAT.

Código de la práctica	$I_{\Delta H \max}$	$I_{INT \max}$	$I_{FL \max}$	$I_{EX \max}$	$I_{TOX \max}$	$I_{COR \max}$	$I_{Cl \text{ Exp}}$	$I_{PI \text{ Exp}}$	I_{TI}
CAP	-	-	-	-	-	-	0	0	0
DHA	4	4	3	1	2	0	14	0	14
DNO	4	3	2	1	3	0	13	0	13
DNH	3	4	0	0	6	0	13	0	13
DPT	-	-	-	-	-	-	0	0	0
DHC	4	3	0	0	6	0	13	0	13
MAL	3	2	0	0	4	0	9	0	9
DSO	4	3	0	0	5	0	12	0	12
DHS	3	4	0	0	6	0	13	0	13
DOA	3	4	0	0	6	0	13	0	13
ACL	4	4	0	0	4	0	12	0	12
GCT	0	4	0	4	-	1	9	0	9
AFA	3	4	1	1	4	0	13	0	13
DMA	4	3	2	1	3	0	13	0	13
DAC	4	4	4	3	3	0	18	0	18
MMT	0	4	0	4	0	1	9	0	9
DCA	4	2	3	1	4	0	14	0	14
ONM	4	4	4	1	5	1	19	0	19
CFL	-	3	1	0	4	0	8	0	8
DAP	-	3	2	1	3	0	9	0	9
DNK	4	3	0	0	6	0	13	0	13
ACC	4	4	0	0	4	0	12	0	12

En el caso específico de las prácticas CAP y DPT estas no presentan valores asociados a los parámetros estudiados debido a que el procedimiento no emplea sustancias químicas. En la figura 1 se muestra una comparación de las prácticas CFL y ONM con menor (8) y mayor (19) $I_{TI \text{ EXP}}$ respectivamente; donde se denota que la práctica ONM se aproxima más al $I_{TI \text{ TEO}}$.

El $I_{TI \text{ EXP}}$ mínimo obtenido corresponde a la práctica CFL con un valor de 8, esto obedece principalmente a que el ácido benzoico utilizado presenta valores de inflamabilidad, explosividad y corrosión cercanos al límite mínimo establecido (0-1). En el caso de la interacción química la puntuación asignada (3) se asocia a la emisión de gases tóxicos e inflamables producto del proceso de descomposición de la sustancia. Para esta práctica el mayor de los subíndices corresponde al I_{TOX} (4), lo cual se debe al valor de TLV de reactivos químicos con un valor de 1,0011 ppm.

Por el contrario, el valor máximo de I_{TI} corresponde a la práctica ONM con un $I_{TI \text{ EXP}}$ igual a 19, este valor obedece primordialmente al uso del metano, cuya entalpía de formación es extremadamente exotérmica (-4663,3 J/g), se identifica como un gas considerablemente inflamable (-188°C), lo que propicia la generación de fuego, así como la formación de mezclas inflamables y explosivas con agentes oxidantes debido a su rango de explosividad (5-15%). El metano presenta además un valor de TLV de 1 ppm, que corresponde a un valor de subíndice

de toxicidad de 5; por lo que forma parte del 42,11% de las sustancias con mayor subíndice de entalpía de formación, 3,95% de reactivos inflamables y 14,47% para la toxicidad respectiva. Cabe destacar que esta sustancia por su capacidad corrosiva se almacena comúnmente en cilindros de acero inoxidable, por lo que su valor de I_{COR} es 1.

En la figura 2 se representa el porcentaje de reactivos químicos con las puntuaciones más altas correspondientes a cada subíndice de I_{CI} , lo que evidencia principalmente la utilización de sustancias con mayor entalpía de formación capaces de liberar mucha energía (42,11%) tal es el caso de sustancias como carbonato de sodio (Na_2CO_3), isopropanol (CH_3H_8O), ácido acético glacial (CH_3COOH), ácido sulfúrico (H_2SO_4), entre otros. Mientras que, es menor la utilización de sustancias con bajos puntos de inflamabilidad y amplios rangos de explosividad (3,95%) como acetaldehído (CH_3CHO) y etileno (C_2H_4).

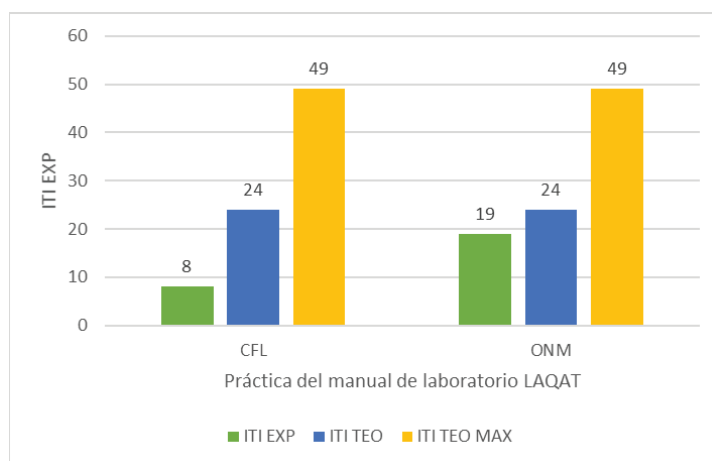


Figura 1. Comparación las prácticas del manual de laboratorio LAQAT con menor y mayor $I_{TI EXP}$.

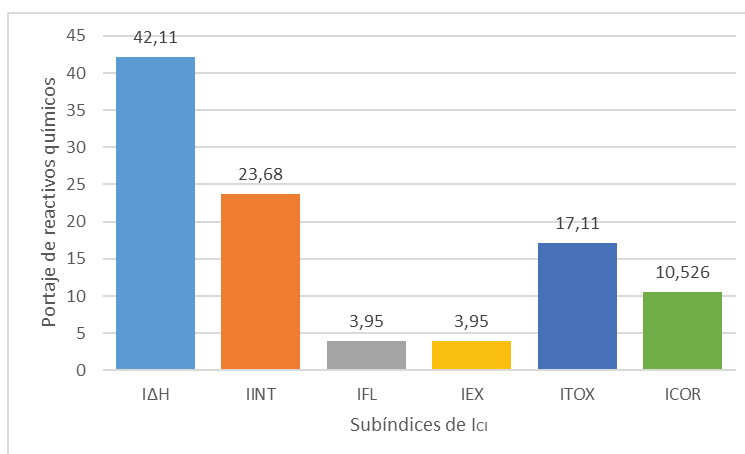


Figura 2. Porcentaje de reactivos químicas con las puntuaciones más altas correspondientes a cada subíndice I_{CI} .

En las figuras 3 y 4 se comparan los valores experimentales de cada práctica ($I_{TI EXP}$) con el valor $I_{TI TEO MAX}$ (49) (gráfico 3) y con el valor $I_{TI TEO}$ (24) (gráfico 4). De acuerdo con el gráfico 3 la práctica más cercana al valor $I_{TI TEO MAX}$ (49) es la práctica ONM con un valor de $I_{TI EXP}$ de 19. Por su parte, la práctica con el valor más lejano al $I_{TI TEO MAX}$ (49) es CFL con un valor de 8. No

obstante la mayoría de las prácticas presentan valores lejanos al $I_{TI\ TEO\ MAX}$ con un promedio de 11,32 esto obedece a que el $I_{TI\ TEO\ MAX}$ contempla valores asociados a una escala industrial, por lo tanto, se descarta ya que no representa las condiciones reales del laboratorio.

Con respecto al gráfico 4 la práctica más cercana al valor $I_{TI\ TEO}$ (24) es la práctica ONM con un valor de $I_{TI\ EXP}$ de 19 y un porcentaje de error de 20,83%, esto representa una cercanía al $I_{TI\ TEO}$ (24), por lo que ONM es la práctica que posee mayor riesgo químico, lo anterior obedece a las características fisicoquímicas y toxicológicas de las sustancias utilizadas en el desarrollo de la práctica. Por otra parte, la práctica con el valor más lejano al $I_{TI\ TEO}$ (24) es CFL con un valor de 8, cuyo porcentaje de error es 66,67%, esto representa una lejanía al $I_{TI\ TEO}$ (24), por lo que CFL es la práctica que posee menor riesgo químico, contrariamente a OMN la naturaleza química de las sustancias empleadas no representan la puntuación máxima en los índices estudiados disminuyendo el riesgo químico de la práctica.

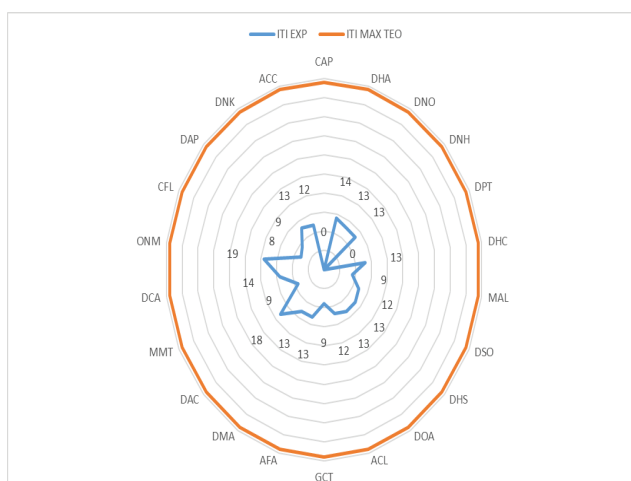


Figura 3. Comparación de los valores experimentales de los índices de seguridad inherente total ($I_{TI\ EXP}$) de las prácticas con respecto al valor del índice de seguridad inherente total teórico máximo ($I_{TI\ TEO\ MAX}$).

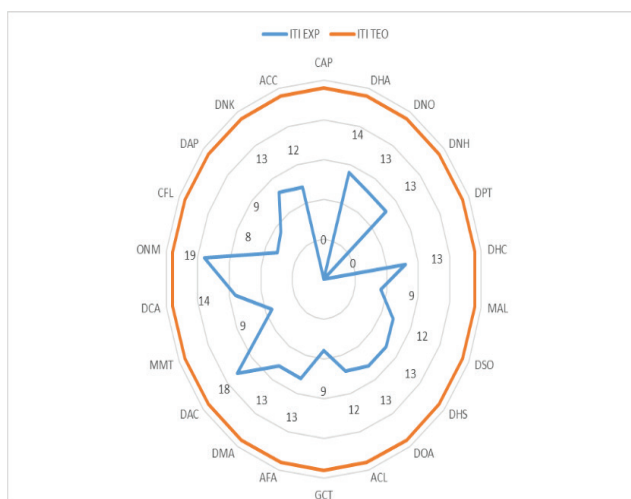


Figura 4. Comparación de los valores experimentales de los índices de seguridad inherente total ($I_{TI\ EXP}$) de las prácticas con respecto al valor del índice de seguridad inherente total teórico máximo ($I_{TI\ TEO}$).

En el cuadro 16 se muestran los valores de $I_{TI\ EXP}$, $I_{TI\ TEO}$ y sus porcentajes de error para la determinación del nivel de riesgo experimental del laboratorio LAQAT obteniendo un $I_{TI\ EXP}$ total de 249, que en comparación con el $I_{TI\ TEO}$ total (528) presenta un porcentaje de error de 52,84%. Las prácticas de “Determinación de oxígeno, nitrógeno, monóxido de carbono, dióxido de carbono y metano por cromatografía de gases” y “Determinación de aldehídos en aire por medio de cartuchos de extracción en fase sólida” representan las metodologías con mayor nivel de riesgo de todo el laboratorio. Dichas prácticas tienen un $I_{CI\ EXP}$ con valores de 19 y 18 respectivamente (valores de $I_{CI\ EXP}$ más altos), lo cual obedece a los valores obtenidos en los subíndices de interacción química, entalpía de formación, inflamabilidad y toxicidad de cada una de las prácticas.

Cuadro 16. Determinación del nivel de riesgo químico del laboratorio LAQAT.

Código de la práctica	$I_{TI\ EXP}$	$I_{TI\ TEO}$	Porcentaje de error (%)
CAP	0	24	100,00
DHA	14	24	41,67
DNO	13	24	45,83
DNH	13	24	45,83
DPT	0	24	100,00
DHC	13	24	45,83
MAL	9	24	62,50
DSO	12	24	50,00
DHS	13	24	45,83
DOA	13	24	45,83
ACL	12	24	50,00
GCT	9	24	62,50
AFA	13	24	45,83
DMA	13	24	45,83
DAC	18	24	25,00
MMT	9	24	62,50
DCA	14	24	41,67
ONM	19	24	20,83
CFL	8	24	66,67
DAP	9	24	62,50
DNK	13	24	45,83
ACC	12	24	50,00
Total	249	528	52,84

Conclusiones

Este estudio se realizó para evaluar el riesgo químico del manual de laboratorio LAQAT por medio de la metodología de Seguridad Inherente. Al aplicar este método, se analizaron 22 procedimientos con un total 76 sustancias químicas, siendo la práctica de “Determinación de oxígeno, nitrógeno, monóxido de carbono, dióxido de carbono y metano por cromatografía de

gases” la que representó el mayor riesgo químico con un índice de seguridad inherente total de 19. Por otra parte, se determinó un valor de riesgo químico de 249 con un porcentaje de error de 52,84% para el laboratorio LAQAT, por lo que se concluyó que no representa un riesgo significativo.

De los reactivos evaluados el 42,11% correspondieron a sustancias extremadamente exotérmicas, 23,68% fueron considerados explosivos, 10,53% presentaron la capacidad de liberar gases tóxicos e inflamables, formar calor o rápida de polimerización; 3,95% se clasificaron como compuestos muy inflamables con el rango máximo de explosividad, 17,11% se identificaron con el menor límite de toxicidad ($TLV \leq 0.1$) y 10,53% requirieron un material especial para su almacenamiento.

Finalmente, la metodología de Seguridad Inherente aplicada no se considera una técnica adecuada para evaluar el riesgo químico del laboratorio LAQAT, ya que contempla parámetros a escala industrial que no representan las condiciones reales del laboratorio. Además, no toma en cuenta las vías de exposición a las sustancias químicas, no establece escalas para categorizar el grado del riesgo químico en: bajo, medio y alto; así como tampoco proporciona información referente a las acciones correctivas a ejecutar.

Referencias

- [1] S. Hidalgo y P. Rivera, “Programa de comunicación del riesgo químico y sus alternativas de solución”, tesis MSc, Instituto Tecnológico de Costa Rica, pp. 10, 2010.
- [2] Dirección de gestión de calidad ambiental, Política Nacional de Seguridad Química. [Online]. Disponible en: <http://www.digeqa.go.cr/areas/politica-nacional-de-seguridad-quimica>
- [3] Consejo de Salud Ocupacional, (2020, 07 de octubre), Acerca del Consejo de Salud Ocupacional, [Online]. Disponible en: https://www.cso.go.cr/quienes_somos/index.aspx#HERMES_TABS_1_1
- [4] Comisión Nacional de Emergencias, “Informe nacional de monitoreo 2019”, San José, Costa Rica, 2019.
- [5] M. Tamés, “Guía técnica para la evaluación y prevención de los riesgos relacionados con los agentes químicos presentes en los lugares de trabajo”. Editorial Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT): Madrid, pp. 12-34, 2013.
- [6] E. Medina, “Programa de gestión de los elementos de protección personal para el laboratorio químico: Reactivos SAS,” Ph.D.dissertation. Especialización en riesgos laborales, salud y seguridad en el trabajo, Corporación universitaria minuto de Dios, Bogotá, pp. no indica, 2018.
- [7] Y. Lu, “Integrating chemical Hazard assessment into the design of inherently safer processes,” Ph.D, Texas A&M University, Department of Chemical Engineering, USA, 2011.
- [8] J. Aguilar, *et al.* “Riesgo Químico: sistemática para la evaluación higiénica”. Editorial Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT): Madrid, pp. 11-50, 2010.
- [9] R. Jiménez, *et al.* “Herramientas para la gestión del riesgo químico. Métodos de evaluación cualitativa y modelos de estimación de la exposición”. Editorial Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT): Madrid, pp. 40-53, 2017.
- [10] A. Heikkilä, “Inherent safety in process plant design, Technical research center of Finland”, pp. 1–132, 1999.
- [11] J. Seral y E. Gadea, “Seguridad inherente: rutas de síntesis y diseño de procesos,” Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el trabajo, pp. 1-6, 2016.
- [12] S. Park, S. Xu, W. Rogers, H. Pasman y M. El-Halwagi, “Incorporating inherent safety during the conceptual process design stage: A literature review,” *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 63, nº 104040, pp. 2-28, 2019.
- [13] D. Mansfield, L. Pouler y T. Kletz, “Improving Inherent Safety,” *Offshore Technology Report*, vol. 96, nº 521, pp. 1-61, 1996.
- [14] X. Gao, A. A. Abdul Raman, H. F. Hizaddin, and M. M. Bello, “Systematic review on the implementation methodologies of inherent safety in chemical process,” *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 65, no. March, p. 104092, 2020, doi: 10.1016/j.jlp.2020.104092.

- [15] E. Rodríguez, M. Campinas, J. L. Acero, and M. J. Rosa, "Investigating PPCP Removal from Wastewater by Powdered Activated Carbon/Ultrafiltration," *Water. Air. Soil Pollut.*, vol. 227, no. 6, 2016, doi: 10.1007/s11270-016-2870-7.
- [16] M. Hassim and M. Hurme, "Inherent occupational health assessment during process research and development stage". *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 23, pp. 127-138, Jun. 2009.
- [17] P. Narváez, "Selección de la ruta química", en *Diseño conceptual de procesos químicos Metodología con aplicaciones en esterificación*. Editorial Universidad Nacional de Colombia: Bogotá, pp. No indica, 2014.
- [18] *Manual de laboratorio de análisis LAQAT*, 2016. Universidad Nacional de Costa Rica.
- [19] Carl Roth - International, 2020. [Online]. Disponible en: <https://www.carlroth.com/com/en/>. [Accesado: Octubre, 6, 2020].
- [20] Fisher Scientific, 2020. [Online]. Disponible en: <https://www.fishersci.com/us/en/catalog/search/sdshome.html>. [Accesado: Octubre, 6, 2020]
- [21] Merck, 2020. [Online]. Disponible en: <https://www.merckmillipore.com/GT/es?ReferrerURL=https%3A%2F%2Fwww.google.com%2F>. [Accesado: octubre 6, 2020]
- [22] NIST, 2020. [Online]. Disponible en: <https://www.nist.gov> [Accesado: octubre 16, 2020]
- [23] Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica, 2020. [Online]. Disponible en: <https://www.imn.ac.cr/reporte-pronostico-regional> [Accesado: octubre 20, 2020]
- [24] Centro de Investigaciones Geofísicas de la Universidad de Costa Rica, 2020. [Online]. Disponible en: http://meteoro.ucr.ac.cr/estaciones/ingenieria/hist_patmos.html [Accesado: octubre 20, 2020]