



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO

FACULTAD DE QUÍMICA

**“ESTUDIOS DE ESTABILIDAD DE ARSÉNICO (As) Y
BISMUTO (Bi) EN UN MATERIAL DE REFERENCIA
DE COBRE (Cu)”**

TESIS INDIVIDUAL

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO EN MATERIALES

PRESENTA

OSWALDO HERNÁNDEZ MORENO

DIRIGIDA POR

Dr. ADRIÁN SOSA DOMÍNGUEZ

SANTIAGO DE QUERÉTARO, QUERÉTARO, 2025.

La presente obra está bajo la licencia:
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es>



CC BY-NC-ND 4.0 DEED

Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional

Usted es libre de:

Compartir — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato

La licenciante no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia

Bajo los siguientes términos:



Atribución — Usted debe dar [crédito de manera adecuada](#), brindar un enlace a la licencia, e [indicar si se han realizado cambios](#). Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciante.



NoComercial — Usted no puede hacer uso del material con [propósitos comerciales](#).



SinDerivadas — Si [remezcla, transforma o crea a partir](#) del material, no podrá distribuir el material modificado.

No hay restricciones adicionales — No puede aplicar términos legales ni [medidas tecnológicas](#) que restrinjan legalmente a otras a hacer cualquier uso permitido por la licencia.

Avisos:

No tiene que cumplir con la licencia para elementos del material en el dominio público o cuando su uso esté permitido por una [excepción o limitación](#) aplicable.

No se dan garantías. La licencia podría no darle todos los permisos que necesita para el uso que tenga previsto. Por ejemplo, otros derechos como [publicidad, privacidad, o derechos morales](#) pueden limitar la forma en que utilice el material.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO

FACULTAD DE QUÍMICA

**“ESTUDIOS DE ESTABILIDAD DE ARSÉNICO (As) Y
BISMUTO (Bi) EN UN MATERIAL DE REFERENCIA DE COBRE
(Cu)”**

TESIS INDIVIDUAL

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO EN MATERIALES

PRESENTA

OSWALDO HERNÁNDEZ MORENO

DIRIGIDA POR

Dr. ADRIÁN SOSA DOMÍNGUEZ

SINODALES

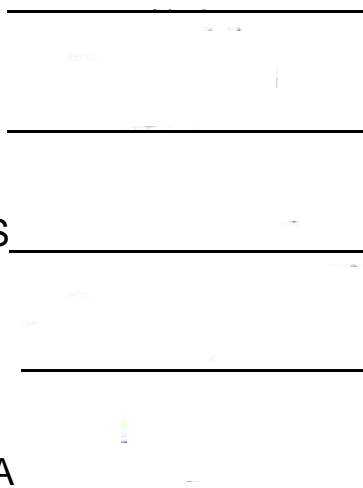
**Dr. ADRIÁN SOSA DOMÍNGUEZ
DIRECTOR**

**I.Q. EDITH VALLE MOYA
SINODAL**

**M en C. FRANCISCO JAVIER MARTÍNEZ RÍOS
SINODAL**

**Dra. ROSALBA HERNÁNDEZ LEOS
SINODAL**

**Dra. AIME MARGARITA GUTIÉRREZ PERALTA
SINODA**



ÍNDICE GENERAL

Contenido	Página
ÍNDICE GENERAL	i
ÍNDICE DE CUADROS	v
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
RESUMEN	
1. ANTECEDENTES	1
1.1 Metrología	1
1.2 Trazabilidad Metrológica	1
1.3 CENAM	2
1.4 Patrones nacionales de referencia	3
1.5 Material de referencia	3
1.6 Importancia y obtención de cobre	5
1.7 Importancia de As y Bi en el cobre	6
1.8 Usos del patrón de referencia concentrado de Cu	7
1.9 Estabilidad	8
1.10 Estabilidad a largo y corto plazo	9
1.11 Concentraciones e importancia de As y Bi en el MRC de cobre	10
1.12 Técnicas analíticas para la medición de As y Bi	11
1.13 Espectrómetro de masas de sector magnético con plasma acoplado inductivamente (ICP-SFMS)	12
2. OBJETIVOS	13
2.1 General	13
2.2 Específicos	13
3. METODOLOGÍA	14
3.1 Material	14
3.1.1 Materiales	14
3.1.2 Reactivos	14
3.1.3 Equipo	14

3.2 Métodos	15
3.2.1 Limpieza	15
3.2.2 Regeneración del perclorato de sodio	15
3.2.3 Digestión de Muestras	15
3.2.4 Preparación de muestras	16
3.2.5 Medición por Espectrómetro de masas de sector magnético con plasma acoplado inductivamente (ICP-SFMS)	16
3.2.6 Determinación de la fracción de masa de arsénico y bismuto	17
3.2.7 Evaluación de la estabilidad por el modelo matemático de regresión lineal	18
3.3 Diseño experimental	20
3.3.1 Selección aleatoria de muestra	20
3.3.2 Proceso de pesado de muestras	20
3.3.3 Estudio isócrono	20
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	22
4.1 Estudio de estabilidad de la fracción de masa de $w(\text{Bi})$	22
4.1.1 Curva de calibración $w(\text{Bi})$	22
4.1.2 Medición de la fracción de masa de Bi por ICP-SFMS	23
4.1.3 Estimación de la estabilidad para Bi a diferentes temperaturas	25
4.2 Estudio de estabilidad de la fracción de masa de $w(\text{As})$	31
4.2.1 Curvas de calibración $w(\text{As})$	31
4.2.2 Medición de la fracción de masa de As por ICP-SFMS	32
4.2.3 Estimación de la estabilidad para As a diferentes temperaturas	34
5. CONCLUSIONES	40
6. BIBLIOGRAFÍA	41

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro		Página
1	Propiedades generales del Cobre	5
	Comparación de las propiedades del cobre con una alta y baja	
2	concentración de As y Bi	7
	Método de digestión ácida en sistema cerrado de reacción	
3	acelerada asistida por microondas	16
4	ANOVA de regresión lineal	19
5	Curva de calibración $w(\text{Bi})$ ICP-SMFS	22
6	Fracción de masa de bismuto $w(\text{Bi})$	26
7	Fracción de masa de bismuto $w(\text{Bi})$	27
8	Fracción de masa de bismuto $w(\text{Bi})$	28
9	Método de análisis de varianza de regresión lineal	30
10	Prueba estadística t -Student y del valor de p	30
11	Vida útil en relación con la estabilidad a largo plazo	29
12	Curva de calibración $w(\text{As})$ ICP-SMFS	31
13	Fracción de masa de arsénico $w(\text{As})$	35
14	Fracción de masa de arsénico $w(\text{As})$	36
15	Fracción de masa de arsénico $w(\text{As})$	37
16	Método de análisis de varianza de regresión lineal	39
17	Prueba estadística t -Student y del valor de p	39
18	Vida útil en relación con la estabilidad a largo plazo.	38

ÍNDICE DE FIGURAS

Figuras	Página
1 Cadena de trazabilidad metrológica	2
2 Cadena de patrones de trazabilidad metrológica por laboratorios de calibración	4
3 Estudio isócrono de estabilidad.	21
4 Curva de calibración $w(\text{Bi})$ de la secuencia de medición por ICP-SMFS	23
5 Fracción de masa de bismuto $w(\text{Bi})$ para las muestras de concentrado de cobre (CMR-6200675b) a 20 °C a las 6 semanas de estudio.	24
6 Fracción de masa de bismuto $w(\text{Bi})$ para las muestras de concentrado de cobre (CMR-6200675b) a 35 °C a las 6 semanas de estudio.	24
7 Fracción de masa de bismuto $w(\text{Bi})$ para las muestras de concentrado de cobre (CMR-6200675b) a 50 °C a las 6 semanas de estudio.	25
8 Estabilidad de $w(\text{Bi})$ en las muestras de concentrado de cobre (CMR-6200675b) a 20 °C a las 6 semanas de estudio	26
9 Estabilidad de $w(\text{Bi})$ en las muestras de concentrado de cobre (CMR-6200675b) a 35 °C a las 6 semanas de estudio	27
10 Estabilidad de $w(\text{Bi})$ en las muestras de concentrado de cobre (CMR-6200675b) a 50 °C a las 6 semanas de estudio	28
11 Curva de calibración $w(\text{As})$ de la secuencia de medición por ICP-SMFS	32
12 Fracción de masa de arsénico $w(\text{As})$ para las muestras de concentrado de cobre (CMR-6200675b) a 20 °C a las 6 semanas de estudio	33
13 Fracción de masa de arsénico $w(\text{As})$ para las muestras de	33

	concentrado de cobre (CMR-6200675b) a 35 °C a las 6 semanas de estudio	
14	Fracción de masa de arsénico $w(\text{As})$ para las muestras de concentrado de cobre (CMR-6200675b) a 50 °C a las 6 semanas de estudio	34
15	Estabilidad de $w(\text{As})$ en las muestras de concentrado de cobre (CMR-6200675b) a 20 °C a las 6 semanas de estudio	35
16	Estabilidad de $w(\text{As})$ en las muestras de concentrado de cobre (CMR-6200675b) a 35 °C a las 6 semanas de estudio	36
17	Estabilidad de $w(\text{As})$ en las muestras de concentrado de cobre (CMR-6200675b) a 50 °C a las 6 semanas de estudio	37

RESUMEN

El material de referencia de concentrado de cobre (MRC de Cu) es una sustancia usada para garantizar precisión, fiabilidad, validez y control de calidad en análisis, desarrollo y validación de métodos analíticos en fracción de masa en arsénico y bismuto, asegurando así, que las mediciones sean trazables metrológicamente al Sistema Internacional (SI) de Unidades, concepto de sinónimo de calidad total. El estudio de estabilidad de Arsénico y Bismuto en el MRC de Cu tendrá como finalidad conocer la concentración y estabilidad de los elementos en el MRC, para garantizar la calidad del concentrado de cobre y poder cumplir con regulaciones, mantener las propiedades deseadas del material y asegurar la salud y seguridad, este estudio se realizó siguiendo los lineamientos establecidos en la Norma Internacional ISO 17034:2016 y Guía ISO 35:2017 (Anexo B.3.4) Se realizó un estudio a largo plazo (método clásico) empleando el método de estudio a corto plazo (método isócrono), siendo influenciado por diferentes efectos como el almacenamiento a ciertas temperaturas. Este estudio se realizó empleando tres temperaturas de almacenamiento 20 °C, 35 °C y 50 °C y posteriormente se midió la fracción de masa de arsénico y bismuto empleando la técnica de espectrometría de masas de sector magnético con plasma acoplado inductivamente (ICP-SFMS), estableciendo condiciones experimentales adecuadas para estimar la incertidumbre de acuerdo con la estabilidad del Arsénico y Bismuto en el MRC de Cu. Los resultados fueron evaluados estadísticamente empleando el análisis de varianza de regresión lineal (ANOVA), cuyos parámetros fueron estimados empleando la prueba *t*-Student y *p* (probabilidad). El estudio de estabilidad determinó que la fracción de masa de arsénico y bismuto es estable en el rango de temperaturas de 20 °C a 50 °C. La incertidumbre estimada de estabilidad a las seis semanas de estudio fue para $u[w(\text{Bi})] = 1.99 \text{ mg/kg}$, y $u[w(\text{As})] = 2.15 \text{ mg/kg}$.

1. ANTECEDENTES

1.1 Metrología

Los primeros registros de actividades metrológicas provienen de las antiguas civilizaciones como Egipto y Mesopotamia, donde se utilizaban medidas estandarizadas para fines comerciales y de construcción, donde la estandarización de las unidades de medida fue esencial para facilitar el comercio y la construcción de monumentos, dicho esto, la metrología es la ciencia de la medición, se necesita la definición, establecimiento y aplicación de unidades de medida, así como de la precisión y exactitud de las mediciones para poder llevarse a un campo de estudio. Su objetivo principal es asegurar que las mediciones sean consistentes, comparables y confiables a nivel internacional, siendo de vital importancia entender la metrología para comprender el motivo por el cual se está realizando el proyecto, el cual tiene como objetivo demostrar la trazabilidad en la medición de las concentraciones de Arsénico y Bismuto, mediante un estudio de estabilidad, demostrando que el MRC de cobre tiene concentraciones dentro de los rangos donde el cobre no pierde propiedades y puede ser referencia en futuras mediciones (Gómez y Martínez, 2020).

1.2 Trazabilidad metrológica

La trazabilidad en las mediciones se define en el vocabulario internacional de metrología (VIM) como, “La propiedad de un resultado de medida por el cual el resultado puede relacionarse con una referencia mediante una cadena ininterrumpida y documentada de calibraciones, cada una de las cuales contribuye a la incertidumbre de medida” (Joint Committee for Guides in Metrology, 2012). Definiendo así que la trazabilidad metrológica es una capacidad de obtener mediciones muy cercanas al valor real, procediendo de procesos de mediciones anteriormente calibrados y registrados, variando por la incertidumbre de varias mediciones realizadas de una referencia estandarizada, como se expresa en la Figura 1, mostrando que la medición viene de mediciones procedentes del valor real, siendo un valor variante por cada una de las incertidumbres de mediciones.

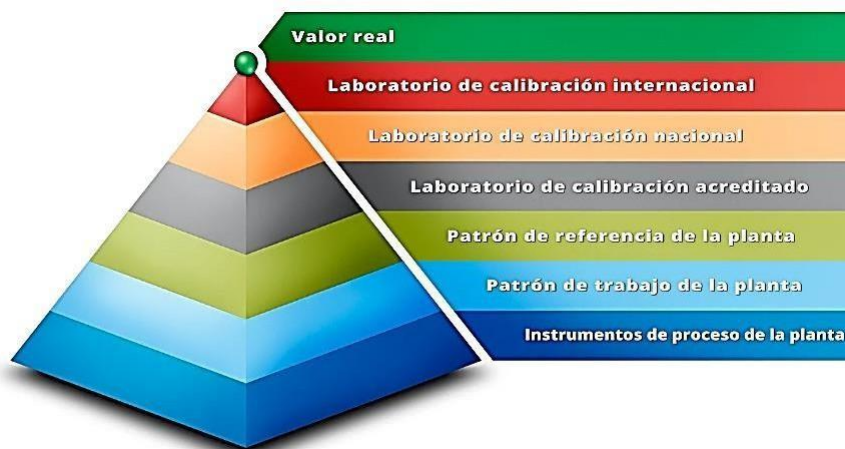


Figura 1. Cadena de trazabilidad metrológica (Consultores en Metrología y Calidad, 2019).

1.3 CENAM

El Centro Nacional de Metrología (CENAM), inicio sus operaciones en 1994, es la institución responsable de mantener el Sistema Nacional de Unidades de Medida en México y asegurar su precisión y confiabilidad. Su misión principal es garantizar la calidad de las mediciones en el país mediante la implementación y el desarrollo de estándares metrológicos, así como la calibración y verificación de equipos de medición. CENAM juega un papel crucial en la promoción de la exactitud y la uniformidad en sectores industriales, científicos y comerciales, facilitando así la competitividad y la confianza en el intercambio comercial tanto a nivel nacional como internacional (Gómez y col., 2020). Además, el CENAM está comprometido con la investigación y el desarrollo en metrología, contribuyendo al avance tecnológico y a la mejora continua de los procesos de medición. La institución también colabora con organismos internacionales para asegurar la coherencia de las medidas y fortalecer la infraestructura metrológica global (Ramírez, 2022). El impacto del CENAM en la calidad de los productos y servicios, así como en la confianza pública en las mediciones, subraya su importancia estratégica en el desarrollo económico y científico del país.

1.4 Patrones nacionales de referencia

La existencia de patrones nacionales asegura que las mediciones sean comparables y consistentes a lo largo del tiempo en la medición de elementos en diferentes laboratorios, siendo esencial para la calidad de los productos, procesos y desarrollo de métodos para la investigación científica garantizando la confianza en los métodos de medición comerciales y regulatorios. Los patrones nacionales de referencia son fundamentales para la precisión y consistencia de las mediciones a nivel nacional e internacional. Estos patrones, que incluyen unidades de medida básicas y estándares de referencia, sirven como la base para la calibración y verificación de instrumentos de medición en diversos sectores. Están establecidos y mantenidos por instituciones metroológicas nacionales, como el Centro Nacional de Metrología (CENAM) en México, y tienen un papel crucial en la armonización de medidas entre diferentes países y regiones (Hernández y col., 2021).

La actualización y mantenimiento de estos patrones requieren una infraestructura metroológica robusta y una colaboración constante con organismos internacionales como la Oficina Internacional de Pesas y Medidas (BIPM) (López y Vargas, 2022). Los patrones nacionales no solo garantizan la exactitud de las mediciones locales, sino que también facilitan el comercio internacional al asegurar la igualdad de las medidas entre diferentes países. La continua mejora, regulación y calibración de estos patrones son esenciales para mantener la integridad del sistema de medición global y para apoyar el desarrollo de nuevas tecnologías y metodologías de medición.

1.5 Material de referencia

Un material de referencia se define como un medio de comparación de alta calidad y homogeneidad que posee características físicas, químicas o biológicas conocidas y establecidas, con el cual podemos comparar mediciones realizadas. Estos materiales son cruciales para la calibración de instrumentos de medición y la validación de métodos analíticos, ya que permiten asegurar la precisión y trazabilidad de las mediciones obtenidas ver Figura 2 (Ramírez y Soto, 2021).



Figura 2. Cadena de patrones de trazabilidad metrológica por laboratorios de calibración (ENAC, 2015).

Existen dos conceptos en la metrología, Material de Referencia y Material de Referencia Certificado. De acuerdo al VIM el material de referencia se define como un material homogéneo y estable con respecto a propiedades previamente especificadas, establecido como comparativo en una medición, comparando propiedades cualitativas, siendo así un material que nos permite tener una certeza de las mediciones a realizar. Un material de referencia certificado, es un material de referencia con documentación emitida por un organismo autorizado, el cual proporciona uno o varios valores de propiedades especificadas, con incertidumbres y trazabilidades asociadas, empleando procedimientos validados dependiendo la medición a realizar, dicho esto gracias a estos materiales los laboratorios o instituciones que se encargarían de realizar las mediciones puede corroborar la exactitud de las mediciones obtenidas con un ensayo que pueda ser repetido infinidad de veces con dicha trazabilidad de medición por los materiales de referencia (Hernández y col, 2023).

1.6 Importancia y obtención de cobre

El cobre, conocido por su uso desde la antigüedad, ha sido esencial en la fabricación de herramientas y ornamentos, y su importancia creció durante la Revolución Industrial al convertirse en un material clave para la electricidad y la construcción. Actualmente, se utiliza ampliamente en la electrónica, la fontanería y las energías renovables. Su obtención se realiza principalmente a través de la minería de minerales como la calcopirita y la bornita, seguida de procesos de concentración, fundición y refinación para obtener cobre puro. Además, el reciclaje del cobre, que representa alrededor del 30 % de su uso actual, no solo reduce la necesidad de minería nueva, sino que también minimiza el impacto ambiental, subrayando su relevancia económica y ecológica.

Las características importantes del cobre son su conductividad eléctrica, conductividad térmica, maleabilidad, dureza, resistencia a la corrosión, tenacidad y propiedades antimicrobianas (García y Pérez, M.,2023).

Cuadro 1. Propiedades generales del Cobre (García y Pérez, 2023).

Propiedad	Descripción
Conductividad eléctrica	Excelente, uno de los mejores conductores. (aproximadamente 59.6 MS/m).
Conductividad térmica	Alta, eficiente en la transferencia de calor.
Maleabilidad	Muy alta, se puede deformar en laminas delgadas sin romperse.
Dureza	Intermedia, resistente al desgaste.
Resistencia a la corrosión	Buena, forma una capa protectora de óxido.
Tenacidad	Alta, absorbe energía sin fracturarse
Propiedades antimicrobianas	Efectivas, mata bacterias y patógenos al contacto

1.7 Importancia de As y Bi en el cobre

El Arsénico es un contaminante en minerales de cobre y puede afectar la calidad del metal obtenido. Aunque el Arsénico en pequeñas cantidades puede mejorar ciertas propiedades del cobre, su presencia en niveles grandes cantidades puede resultar en problemas de toxicidad y debilitar el material. A medida que la industria ha evolucionado, se han desarrollado métodos para controlar y reducir el Arsénico en los productos finales, especialmente debido a las regulaciones ambientales cada vez más estrictas (Iyer y Mohan, 2019).

El Arsénico se encuentra típicamente en concentraciones que oscilan entre el 0.1 % y el 2 % en algunos minerales de cobre. En el cobre refinado, el Arsénico generalmente se controla para que esté por debajo del 0.5 % debido a sus efectos adversos en la calidad y toxicidad.

Por otra parte, el Bismuto se presenta en concentraciones más bajas en los minerales de cobre, su manejo también es relevante. Puede influir en la fluidez del metal fundido y en la calidad del cobre producido. Sin embargo, en concentraciones elevadas, el Bismuto puede llevar a la formación de inclusiones y afectar negativamente las propiedades mecánicas del cobre. Al igual que el Bismuto se ha tenido que establecer protocolos para gestionar su contenido, especialmente en aplicaciones eléctricas y electrónicas donde la pureza del metal es crítica (Wang y Xu, 2017).

El Bismuto suele estar presente en concentraciones menores, generalmente entre 0.01 % y 0.2 % en los concentrados de cobre. En el cobre refinado, se busca mantener el Bismuto en niveles muy bajos, típicamente por debajo de 0.1 % a 0.2 %, para asegurar la calidad del metal (García y Pérez, M., 2023).

En el Cuadro 2 se comparan las propiedades del cobre con una concentración de As y Bi considerable con respecto a una concentración alta de As y Bi (García y Pérez, 2023).

Cuadro 2. Comparación de las propiedades del Cobre con una alta y baja concentración de As y Bi (García y Pérez, 2023).

Propiedad	Cobre con As y Bi con concentraciones normales	Cobre con altas concentraciones de As y Bi.
Conductividad eléctrica	Alta (aproximadamente 59.6 MS/m)	Baja
Resistencia a la corrosión	Buena	Mala
Dureza	Intermedia (cuprita blanda)	Mayor, pero se vuelve quebradizo
Tenacidad	Alta	Baja, mayor riesgo de fractura
Maleabilidad	Muy buena	Mala, menor capacidad de deformación
Propiedades mecánicas	Estables	Degradadas, afectando la integridad estructural
Propiedades antimicrobianas	Preservadas	Baja, reduciendo la efectividad
Toxicidad	Baja	Mayor, planteando riesgos para la salud

1.8 Usos del patrón de referencia concentrado de Cu

La importancia de los patrones concentrados de cobre radica en su capacidad para establecer un estándar confiable contra el cual se pueden comparar otras muestras. Estos patrones se elaboran con altos niveles de pureza y se someten a rigurosos procesos de verificación y calibración para asegurar su precisión y estabilidad a lo largo del tiempo, lo que evita variaciones en los resultados y desarrollo de métodos en la industria para la medición de metales puros.

La calidad y la fiabilidad de los patrones concentrados de cobre influyen directamente en la exactitud de las mediciones y en la consistencia de los resultados experimentales, lo que enmarca la necesidad de mantener y actualizar

estos patrones conforme a los avances tecnológicos y las normativas internacionales. Además, el uso de estos patrones contribuye a la interoperabilidad en el comercio global y a la conformidad con los estándares internacionales, fortaleciendo la confianza en los resultados de medición y en los mediciones, análisis y desarrollo como productos o métodos (García y Pérez, 2023).

Los patrones de referencia concentrados de cobre desempeñan un papel crucial en la metrología y la calibración de instrumentos de medición, especialmente en la determinación de la composición y pureza de materiales metálicos, como fue antes señalado lo que nos hace ver la importancia de ver la contaminación de concentrado con algún otro elemento presente como puede ser el Arsénico y Bismuto. Estos patrones utilizados como referencias para garantizar la precisión en la medición de propiedades físicas como la conductividad eléctrica, que es fundamental en diversas aplicaciones industriales y científicas (Martínez y col., 2021). Dado que el cobre es un material de alta conductividad, su uso como patrón de referencia permite una evaluación exacta de la calidad de otros metales y aleaciones, facilitando así su uso en sectores como la electrónica, la fabricación de cables y la investigación de materiales, así como usado en mediciones de metales como Hierro (Smith y Clarke, 2022).

1.9 Estabilidad

La estabilidad en los materiales se refiere a la capacidad de una sustancia para mantener su estructura y propiedades bajo condiciones específicas, sin descomponerse o reaccionar de manera indeseada. Este concepto es fundamental en diversas áreas, incluyendo la química inorgánica, orgánica y física. Históricamente, la estabilidad ha sido estudiada en el contexto de compuestos químicos, donde se examinan factores como la energía de enlace, la configuración electrónica y la temperatura, que influyen en la tendencia de una sustancia a reaccionar o descomponerse. Por lo que es importante que el material a analizar tenga la certeza de que no tendrá un cambio en sus propiedades para poder compararse y tener trazabilidad metrológica (Alonso, 2015). En las

industrias se realizan varios estudios para determinar qué tan estable es el valor con respecto a las mediciones iniciales y las mediciones finales, toman en consideración el material a medir y la reactividad de la sustancia a medir, realizan mediciones intermedias en procesos, así como mediciones finales para tener certeza de que se siga obteniendo la medición deseada, siendo así importante la evaluación de los materiales de referencia, donde se incluyen estudios y análisis de incertidumbre con respecto al tiempo confirmando la estabilidad del material, donde mediremos la estabilidad del As y el Bi (Guía ISO 35, 2017). Siendo el caso evaluaremos la estabilidad de un material de referencia según la guía ISO 35, debemos considerar la estabilidad por incertidumbre de los lotes en este caso concentrado de cobre, evaluando el riesgo de cambio de los metales presentes para ser un material confiable donde indica que el principal propósito es registrar los cambios en las características fisicoquímicas y microbiológicas de un producto cuando se expone a diversas condiciones ambientales, como temperatura, humedad o luz (Ghosh, 2017).

1.10 Estabilidad a largo y corto plazo

Se realizará un estudio de estabilidad para poder evaluar la reactividad del MRC en este caso de concentrado de cobre y los elementos presentes dado su relevancia en la industria como material de referencia y poder usarlo como patrón primario para producciones industriales, evaluando las concentraciones de los elementos (As y Bi), así como su propiedad de mantenerse estable para usos de estudios del cobre, evitando análisis erróneos por dichos elementos. La estabilidad durante el transporte (estabilidad a corto plazo), se relaciona con los efectos adicionales que pueden ocurrir debido al traslado de las muestras, en dado caso donde el traslado de la muestra no cumpla con las condiciones adecuadas deberá considerar una incertidumbre extra para evitar una medición errónea ante los valores de los certificados de los materiales de referencia, por lo que con anterioridad el productor de MRC en este caso el CENAM debe realizar diferentes estudios de estabilidad de los elementos presentes de condiciones a las cuales puede verse expuesto, para poder establecer condiciones de transporte como de uso. (Guía

ISO 35, 2017). La estabilidad a largo plazo va referida a la estabilidad del MRC en las condiciones de resguardo para futuros análisis del material que al igual deben ser emitidas por el fabricante al consumidor de las condiciones en las cuales puede conservarse de manera que los futuros análisis no se vean alterados por el tiempo (Guía ISO 35, 2017).

La importancia del estudio de estabilidad es registrar los cambios en el material de referencia para poder tomar esas consideraciones en las mediciones y obtener mediciones más cercanas al valor real de concentración de la muestra. Básicamente son pruebas y ensayos realizados en condiciones predefinidas, los cuales permiten determinar el tiempo de vida útil (Torres y Gil, 2005).

1.11 Concentraciones e importancia de As y Bi en el MRC de cobre

El Arsénico se encuentra oscilando entre el 0.1 % y el 2 % en algunos minerales de cobre, el Arsénico generalmente se controla para que esté por debajo del 0.5 %. El Bismuto suele oscilar en concentraciones menores, generalmente entre 0.01 % y 0.2 % en los concentrados de cobre, se busca mantener el Bismuto en niveles muy bajos, aproximadamente por debajo de 0.1 % a 0.2 %, para asegurar la calidad del metal (Iyer y Mohán, 2019).

En la industria del cobre, la presencia de elementos traza como el Arsénico (As) y el Bismuto (Bi) en los materiales de referencia certificado (MRC) es de gran importancia debido a su impacto en las propiedades físicas y químicas del cobre. El Arsénico, aunque en concentraciones bajas, puede afectar la conductividad eléctrica del cobre y su resistencia a la corrosión, además de influir en los procesos de refinación del metal (Kumar y col, 2020). Por otro lado, el Bismuto, presente en concentraciones específicas, se utiliza para mejorar la capacidad del cobre para ser mecanizado y procesado, haciendo que el material sea más adecuado para aplicaciones de alta precisión (Smith y Johnson, 2021). La monitorización precisa de estos elementos en los MRC de cobre asegura la calidad del material y su conformidad con las normativas internacionales, garantizando la fiabilidad de las mediciones y las aplicaciones industriales (Li y col., 2022).

La caracterización detallada de estos elementos es esencial para mantener la integridad de los estándares de referencia y para optimizar las propiedades del cobre en diferentes usos industriales y científicos.

1.12 Técnicas analíticas para la medición de As y Bi

La elección de la técnica depende del tipo de la muestra, concentraciones del analito, tipo de muestra y objetivo del análisis de interés (Skoog, 2014), las técnicas con las cuales podemos medir con mayor precisión y sensibilidad As y Bi de forma simultánea son:

Espectrometría de masas (MS): Esta técnica permite detectar y cuantificar elementos a niveles de partes por billón (ppb). La espectrometría de masas, en combinación con la ionización por plasma acoplado inductivamente (ICP- MS), es especialmente efectiva para el análisis de metales pesados como As y Bi (Atkins y Paula, 2010).

Espectroscopia de absorción atómica (AAS): Utilizando una llama o un horno de grafito, esta técnica mide la absorción de luz por los átomos en estado gaseoso, lo que permite detectar concentraciones muy bajas de estos elementos, como es el caso de trazas en un MRC de cobre. (Ghosh, 2017).

Cromatografía líquida acoplada a espectrometría de masas (LC-MS): Esta técnica es útil para analizar compuestos orgánicos que contienen As y Bi, proporcionando tanto identificación como cuantificación con alta sensibilidad (Atkins y Paula, 2010).

Métodos como la voltamperometría y la polarografía permiten medir concentraciones de metales pesados en solución con gran sensibilidad, facilitando la detección de trazas de As y Bi (Ghosh, 2017).

1.13 Espectrómetro de masas de sector magnético con plasma acoplado inductivamente (ICP-SFMS)

El instrumento ICP-SFMS puede medir de forma simultáneamente la concentración de los elementos en una sola medición con un volumen pequeño de muestra, dando un resultado con alta sensibilidad, ya que acoplar masas con ionización es útil porque permite analizar muestras complejas de manera detallada, obteniendo información tanto sobre los tipos de sustancias presentes como sobre sus cantidades, todo con una gran precisión (Wang y Xu, 2019).

2. OBJETIVOS

2.1 General

Evaluar la estabilidad de Arsénico y Bismuto en un material de referencia de concentrado de cobre.

2.2 Específicos

- Evaluar la influencia por los efectos de almacenamiento a diferentes temperaturas mediante un estudio a largo plazo (método clásico) empleando el método de estudio a corto plazo (método isócrono) en la estabilidad de Arsénico y Bismuto.
- Estimar la incertidumbre debida a la estabilidad para Arsénico y Bismuto en el material de referencia de concentrado de cobre con base a los modelos matemáticos de regresión lineal y predicción por el modelo de regresión lineal.

3. METODOLOGÍA

3.1 Material

3.1.1 Materiales

Se utilizó material de laboratorio para llevar a cabo la digestión del concentrado y diluciones de As y Bi (vasos de precipitado, pesa filtros, probetas, etc.), tubos de polietileno de baja densidad y desecadores.

3.1.2 Reactivos

Material de referencia de concentrado de cobre (CMR-6200675b), disolución calibradora de Arsénico (SRM-3103a con número de lote 100818) y disolución calibradora de Bismuto (SRM-3106 con número de lote 991212) de origen NIST, Ácido nítrico HNO_3 (69 – 70) %, J.T. Baker, ácido clorhídrico HCl (36.5 – 38) %, J.T. Baker, ácido fluorhídrico HF (48 – 51) %, J.T. Baker, peróxido de hidrógeno H_2O_2 30 %, J.T. Baker, ácido bórico H_3BO_3 granular, J.T. Baker, perclorato de magnesio $\text{Mg}(\text{ClO}_4)_2$ Sigma Aldrich y agua desionizada 18 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

3.1.3 Equipo

Se utilizó una placa de calentamiento y hornos de calentamiento (Thermo Scientific), para el pesaje de las muestras se utilizó una balanza analítica (Sartorius MSA225S) para la preparación de las muestras, se usó un sistema de digestión por microondas (CEM Corporation modelo MARSXpress,) y recipientes cerrados de teflón (XP- 1500) para el almacenamiento y la disolución de las muestras se utilizó un espectrómetro de masas de sector magnético con plasma acoplado inductivamente ICP-SFMS (Thermo scientific modelo ELEMENT 2,), para la medición de As y Bi en las muestras.

3.2 Métodos

3.2.1 Limpieza

Se llevó a cabo la metodología sugerida por el CENAM, donde se enjuagaron las botellas y tubos de polipropileno de baja densidad con agua desionizada, se llenaron con una disolución de ácido nítrico en una fracción de volumen de 10 %, se dejaron reposar durante 24 horas en la campana de extracción, se desechó la disolución de ácido nítrico, posteriormente se enjuagaron las botellas con agua desionizada tres veces y se escurrieron perfectamente para secarse en el flujo laminar permitiendo el paso del flujo de aire, esto garantizó la limpieza del material utilizado en la preparación y medición del MR, llevando a cabo el mismo procedimiento para cada material necesitado (tubos, probetas, pipetas, pesa filtros, etc.) se llevó un control y etiquetado para cada vaso, tubo, etc.

3.2.2 Regeneración de perclorato de sodio

Se regeneró el perclorato de sodio en recipientes de vidrio de manera homogénea dentro de la estufa, a una temperatura de 110°C por una hora para eliminar la humedad, se dejó enfriar a temperatura ambiente y de nuevo se colocó en los desecadores correspondientes, cuidando que la exposición al ambiente fuera mínima con el perclorato para evitar la humedad en el desecador.

3.2.3 Digestión de muestras

Al finalizar el estudio isócrono, al someter las muestras a las diferentes temperaturas (20, 35 y 50) °C, se llevó a cabo la digestión ácida de todas las muestras empleando la digestión de reacción acelerada asistida por microondas, se colocó una masa de aproximadamente 0.1 g del concentrado de cobre como muestra, se reservaron sobre vasos de alta presión y se adicionaron los ácidos que reaccionaron para poder llevar a cabo la digestión (8 mL de ácido nítrico, 3 mL de ácido clorhídrico, 1 mL de peróxido de hidrógeno y 1 mL de ácido fluorhídrico). Posteriormente las muestras fueron sometidas al procedimiento de digestión por microondas bajo las condiciones instrumentales que se muestran en el Cuadro 3, establecidas por etapas para obtener una digestión homogénea.

Cuadro 3. Método de digestión ácida en sistema cerrado de reacción acelerada asistida por microondas.

Etapa	Potencia Max (w)	Potencia (%)	Rampa (min)	Presión (Psi)	Temperatura (°C)	Mantener (min)
1	1800	100	59	200	190	59
2	1800	100	30	250	200	40

3.2.4 Preparación de muestras

Posterior a la digestión ácida, se llevaron a evaporación las muestras por medio de ácidos, donde se colocaron en vasos de precipitado de polipropileno de 125 mL, se adicionaron 1 mL de ácido bórico al 4.5 % el cual neutralizó los excesos de ácido fluorhídrico y se llevó a calentamiento en placas de calentamiento, a una temperatura de 80 °C hasta que aproximadamente se tuviera un volumen de 5 mL de muestra.

Para finalizar se aforaron a 50 g con ácido nítrico al 2 % (V/V). De la solución anterior, se prepararon dos diluciones, donde la primera dilución se realizó tomando 5 g de alícuota, aforando a 25 g con disolución de ácido nítrico (al 2 % en fracción de volumen) y la segunda dilución tomando 5.7 g de alícuota y aforando a 120 g con disolución de ácido nítrico al 2 % (V/V).

3.2.5 Medición por Espectrómetro de masas de sector magnético con plasma acoplado inductivamente (ICP-SFMS)

La medición de la fracción de masa de arsénico $w(\text{As})$ y bismuto $w(\text{Bi})$ se realizó empleando el método de calibración externa mediante espectrometría de masas de sector magnético con plasma acoplado inductivamente (ICP-SFMS) se usó dado que es una técnica altamente sensible para la detección y cuantificación de elementos traza en muestras. Su funcionamiento se basa en la ionización de los elementos presentes en una muestra mediante un plasma generado por un generador de alta frecuencia (ICP), seguido de la separación de los iones generados en función de su relación masa/carga (m/z) mediante un sector

magnético. Se realizó una curva de calibración bielemental contemplando seis disoluciones a diferentes fracciones de masa de Arsénico $w(\text{As})$ y Bismuto $w(\text{Bi})$ partiendo de los materiales de referencia certificados SRM-3103a y SRM-3106, respectivamente. Se midió la curva de calibración y posteriormente las muestras de manera aleatoria dentro de una secuencia de medición,

Se midió el punto intermedio de la curva de calibración varias veces dentro de la secuencia de medición de manera sucesiva por bloques de muestras con la intención de aplicar el factor de corrección de deriva instrumental (f_d) y tener mediciones lo más cercanas al valor real de fracción de masa de los elementos.

3.2.6 Determinación de la fracción de masa de Arsénico y Bismuto

El modelo matemático para determinar la fracción de masa de Arsénico y Bismuto $w(\text{As}, \text{Bi})$ presente en el concentrado de cobre, se obtendrá mediante la siguiente ecuación.

$$w(\text{As}, \text{Bi}) = [w(\text{As}, \text{Bi}) - w_{\text{bco}}] \cdot \frac{w(\text{As}, \text{Bi})_{\text{MRC, med}}}{w(\text{As}, \text{Bi})_{\text{MRC, prep}}} \cdot \frac{m_{\text{af1}}}{m_x} \cdot \frac{m_{\text{af2}}}{m_{\text{al2}}} \cdot \frac{m_{\text{af3}}}{m_{\text{al3}}}$$

Donde:

w_{bco}	Fracción de masa de As y Bi en la muestra blanco, mg/kg
$w(\text{As}, \text{Bi}) - w_{\text{bco}}$	Fracción de masa de As y Bi en la muestra obtenida en la curva de calibración, mg/kg
$w(\text{As}, \text{Bi})_{\text{MRC, med}}$	Fracción de masa de As y Bi del MRC medida, mg/kg
$w(\text{As}, \text{Bi})_{\text{MRC, prep}}$	Fracción de masa de As y Bi del MRC preparada, mg/kg
m_x	Masa de concentrado de cobre, g
m_{af1}	Masa de aforo, g
m_{al2}	Masa de alícuota en la primera dilución, g
m_{af2}	Masa de aforo de primera dilución, g
m_{al3}	Masa de alícuota en la segunda dilución, g
m_{af3}	Masa de aforo de segunda dilución, g

3.2.7 Evaluación de la estabilidad por el modelo matemático de regresión lineal

Se evaluó la estabilidad de las fracciones de masa aplicando un análisis de varianza (ANOVA) de regresión lineal como se puede ver en el Cuadro 4, y aplicándose dos criterios.

Criterio a)

Se realizó la prueba estadística *t*-Student para una pendiente significativamente diferente de cero obtenida del análisis de regresión lineal ANOVA, es decir la pendiente del modelo de regresión se dividió entre la desviación estándar lo que representa cuantas veces la diferencia entre las medias observadas es mayor que la variabilidad esperada o error estándar dentro de los grupos.

Esto se llevó a cabo calculando el estadístico t_{b1} en la siguiente ecuación y comparándolo con el valor $t_{\text{crítico}}$ de dos colas de *t*-Student para $n - 2$ grados de libertad con un nivel de confianza del 95 %.

$$t_{b1} = \frac{|b_1|}{s(b_1)}$$

Donde:

b_1 = Pendiente del modelo de regresión lineal

$s(b_1)$ = Desviación estándar de la pendiente del modelo de regresión lineal

t-Student con un nivel de confianza del 95 % (Sección B.3.4 ISO 35:2017).

Criterio de aceptación

$$\text{Si } t_{b1} < t_{\text{crítico}}$$

Entonces la pendiente es $\cong 0$ con un nivel de confianza del 95 %, lo cual determina que la fracción de masa del elemento $w(\text{As}, \text{Bi})$ de interés es estable al tiempo de estudio.

Criterio b)

La prueba estadística del valor p se utilizó para garantizar que fracción de masa del elemento $w(\text{As}, \text{Bi})$ de interés en el MRC es estable. En una prueba de significancia, la hipótesis nula H_0 se rechaza si el valor p es menor o igual a un valor umbral predefinido α , que se denomina alfa o nivel de significancia de $\alpha = 0.05$.

Cuadro 4. ANOVA de regresión lineal.

ANÁLISIS DE VARIANZA	Grados de libertad, ν	Suma de cuadrados SS	Promedio de los cuadrados MS	Valor crítico F
Regresión (Modelo)	1	$\sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2$	MS_{reg}	$F = \frac{MS_{\text{reg}}}{S^2}$
Residuos	$n - 2$	$\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2$	$S^2 = \frac{SS}{n-2}$	
Total	$n - 1$	$\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2$		

Criterio de aceptación

Si $p > 0.05$

Se sugiere que no hay diferencias significativas en los valores de la fracción de masa del elemento $w(\text{As}, \text{Bi})$ de interés del MRC, por lo que el valor del mensurando a certificar es estable en el tiempo de estudio.

3.3 Diseño experimental

3.3.1. Selección aleatoria de muestra

Se seleccionó una unidad a partir de un muestreo aleatorio de 256 unidades del material de referencia certificado de concentrado de cobre.

3.3.2 Proceso de pesado de muestras

Se usó una balanza electrónica Sartorius MSA225S para pesar los 54 pesafiltros vacíos (con la tapa sobrepuesta de lado), seguidamente se pesaron 0.5 g de la unidad seleccionada anteriormente y para concluir, se obtuvo el peso del pesafiltro final con muestra, llevando un registro de cada uno para realizar correcciones por incertidumbre del equipo, tomando en cuenta las condiciones de temperatura, presión y humedad dentro de los límites permitidos de acuerdo al Centro Nacional de Metrología.

3.3.3 Estudio isócrono

Se colocaron 18 pesafiltros a diferentes condiciones de temperatura de estudio (20, 35 y 50) °C, para la temperatura de 20 °C se almacenaron de forma hermética en un desecador y para las temperaturas de (35 °C y 50 °C), se utilizaron hornos de calentamiento verificados a la temperatura deseada de 35 °C y 50 °C respectivamente, para poder mantener las condiciones del ambiente se usó como agente desecante perclorato de magnesio y se cerraron al vacío. Al transcurso de una semana se sacaron tres pesafiltros de cada temperatura y se colocaron dentro del desecador correspondiente a cada temperatura, posteriormente se sacaron en tercias las muestras hasta retirar los últimos pesa filtros completando 6 semanas de análisis como se puede ver en la Figura 3.



Figura 3. Estudio isócrono de estabilidad.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Estudio de estabilidad de la fracción de masa de $w(\text{Bi})$

4.1.1 Curva de calibración $w(\text{Bi})$

En el Cuadro 5 se muestra la curva de calibración identificada como MR (material de referencia calibrador) empleada en el cálculo de fracción de masa de bismuto $w(\text{Bi})$ en las muestras del concentrado de cobre, la cual fue medida considerando la fracción de masa del isótopo ^{209}Bi por la técnica de ICP-SFMS. Se obtuvo una curva de calibración para cada medición la cual se puede observar en la Figura 4.

Cuadro 5. Curva de calibración $w(\text{Bi})$ ICP-SMFS.

MR	$I(\text{Bi})$ (cps)
1	50880
2	68404
3	83777
4	101275
5	124236
6	136003

El valor de R^2 fue de 0.9977 para la medición de la curva de calibración mediante la técnica ICP-SFMS considerando la fracción de masa del isótopo ^{209}Bi , como se puede observar en la Figura 4. Lo anterior indica que el modelo de regresión utilizado se ajusta a los datos reales, este coeficiente de determinación también indica la precisión general del modelo (Medlin y col., 2024).

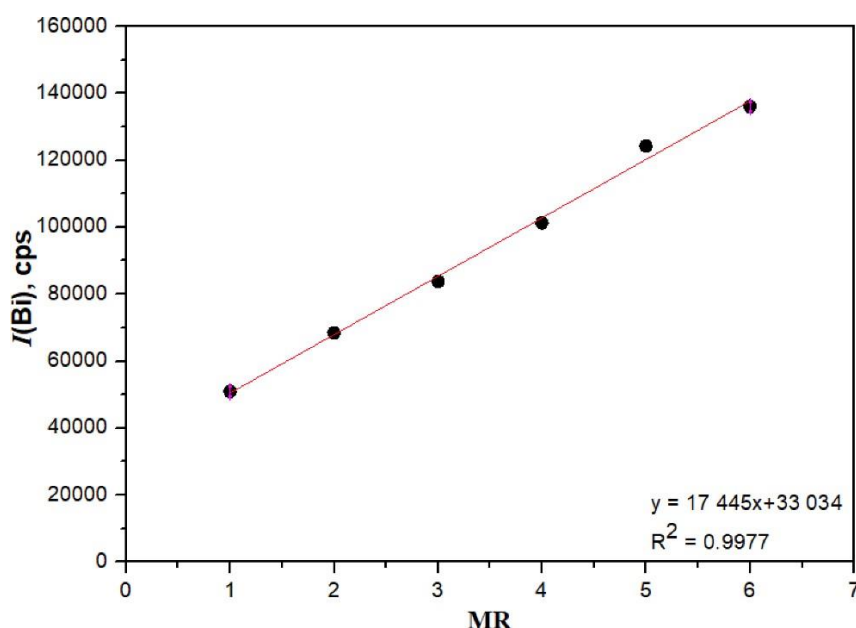


Figura 4. Curva de calibración $w(\text{Bi})$ de la secuencia de medición por ICP-SMFS.

En las mediciones de bismuto se aplicó el factor de corrección por deriva ya que hubo un impacto significativo en la deriva instrumental. La deriva es la variación continua o que se incrementa de una medición a lo largo del tiempo, lo anterior debido a variaciones de las características metrológicas de un instrumento de medición (CENAM).

4.1.2 Estimación de la fracción de masa de Bi por ICP-SFMS

En las Figuras 5, 6 y 7 se muestran los gráficos de la medición de la fracción de masa de bismuto $w(\text{Bi})$ medidas por la técnica de ICP-SMFS empleando el isótopo ^{209}Bi , para cada una de las 18 muestras sometidas a las diferentes temperaturas de 20, 35 y 50 °C. Las mediciones de la fracción de masa de bismuto $w(\text{Bi})$ se realizaron aplicando el factor de deriva instrumental y aplicando el criterio de los datos obtenidos con mayor precisión de acuerdo a lo mencionado en la sección B.3.4 de la Guía ISO 35:2017. En las Figuras 5, 6 y 7 es posible identificar los valores de los coeficientes de variación, así como la pendiente de la ecuación obtenida de la regresión lineal.

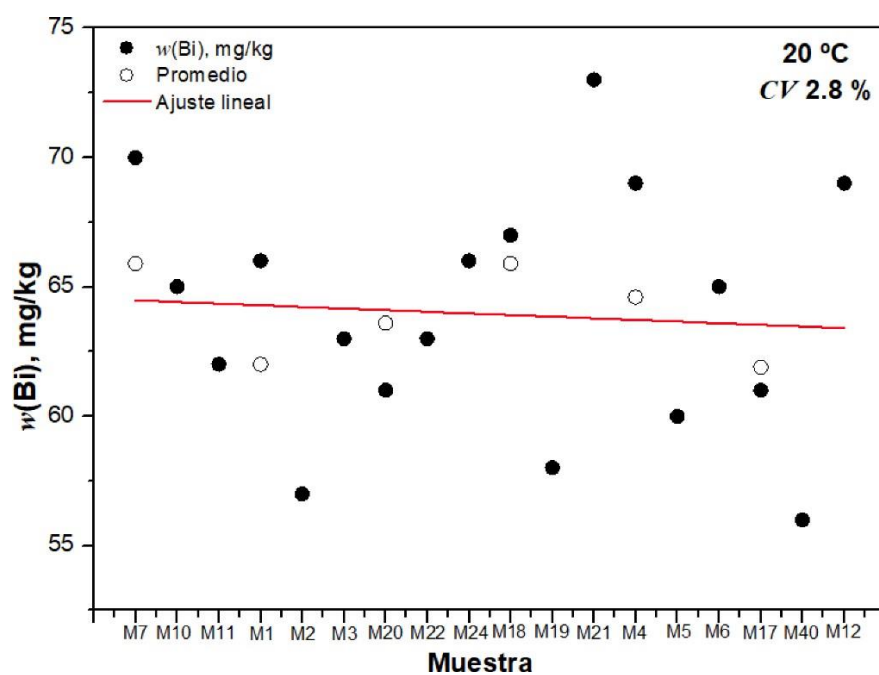


Figura 5. Fracción de masa de bismuto $w(\text{Bi})$ para las muestras de concentrado de cobre (CMR-6200675b) a 20 °C a las 6 semanas de estudio.

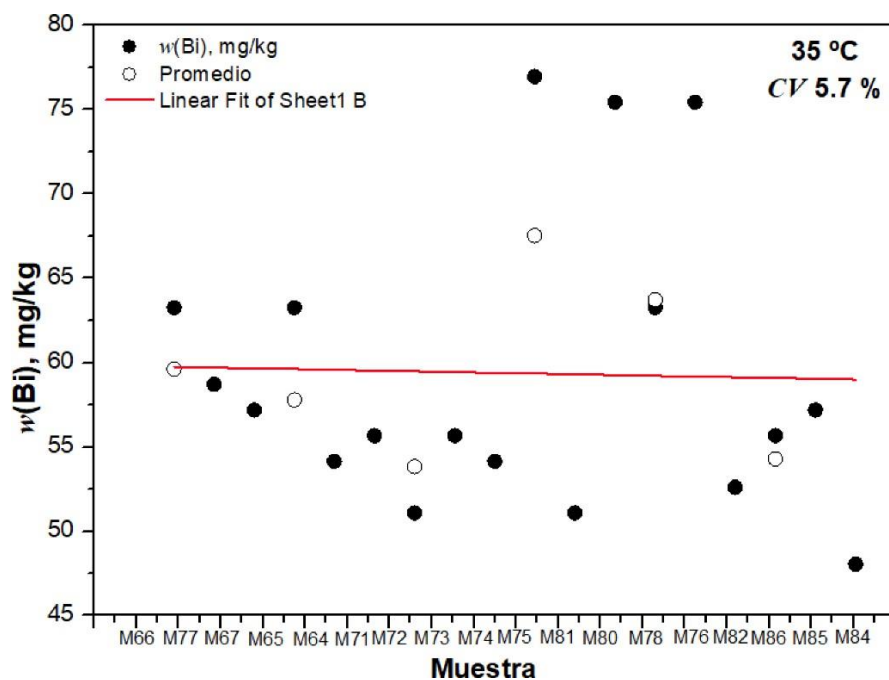


Figura 6. Fracción de masa de bismuto $w(\text{Bi})$ para las muestras de concentrado de cobre (CMR-6200675b) a 35 °C a las 6 semanas de estudio.

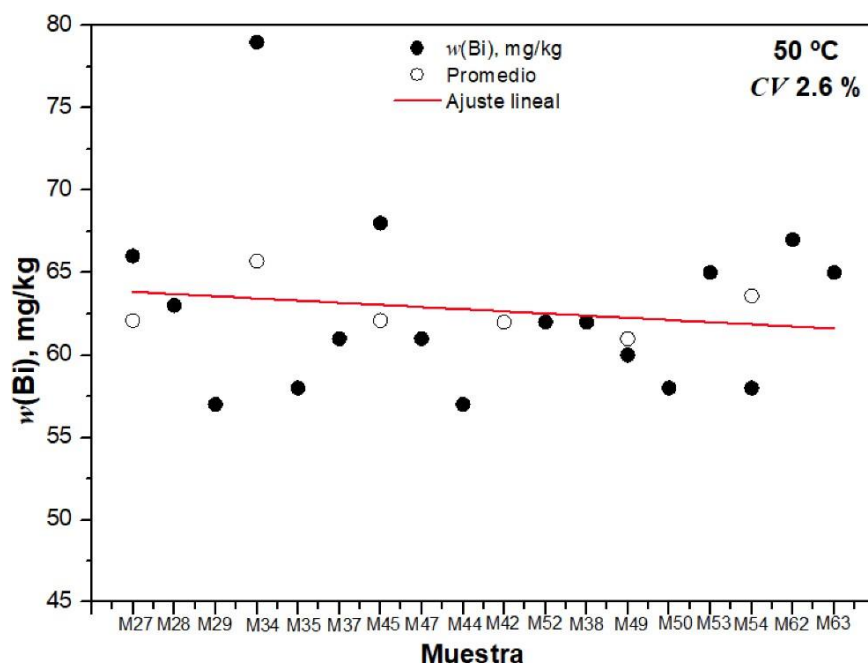


Figura 7. Fracción de masa de bismuto $w(\text{Bi})$ para las muestras de concentrado de cobre (CMR-6200675b) a 50 °C a las 6 semanas de estudio.

Los valores del coeficiente de variación fueron de 2.8 %, 5.7 % y 2.6 % medidos a las temperaturas de (20, 35 y 50) °C, respectivamente. Se observa que a la temperatura de 50 °C existe una menor dispersión de las fracciones de masa de arsénico con respecto a las otras.

4.1.3 Estimación de la estabilidad para Bi a diferentes temperaturas

En los Cuadros 6, 7 y 8 se muestra la fracción de masa de bismuto $w(\text{Bi})$ en el concentrado de cobre considerando la fracción de masa del isótopo ^{209}Bi por la técnica de ICP-SMFS a lo largo del estudio isócrono de seis semanas y en las Figuras 8, 9 y 10 se muestran las tendencias de la fracción de masa de bismuto $w(\text{Bi})$ en el concentrado de cobre a temperaturas de 20, 35 y 50 °C.

Cuadro 6. Fracción de masa de bismuto $w(\text{Bi})$.

Semana	$w(\text{Bi})$, mg/kg
1	66
2	62
3	64
4	66
5	65
6	62

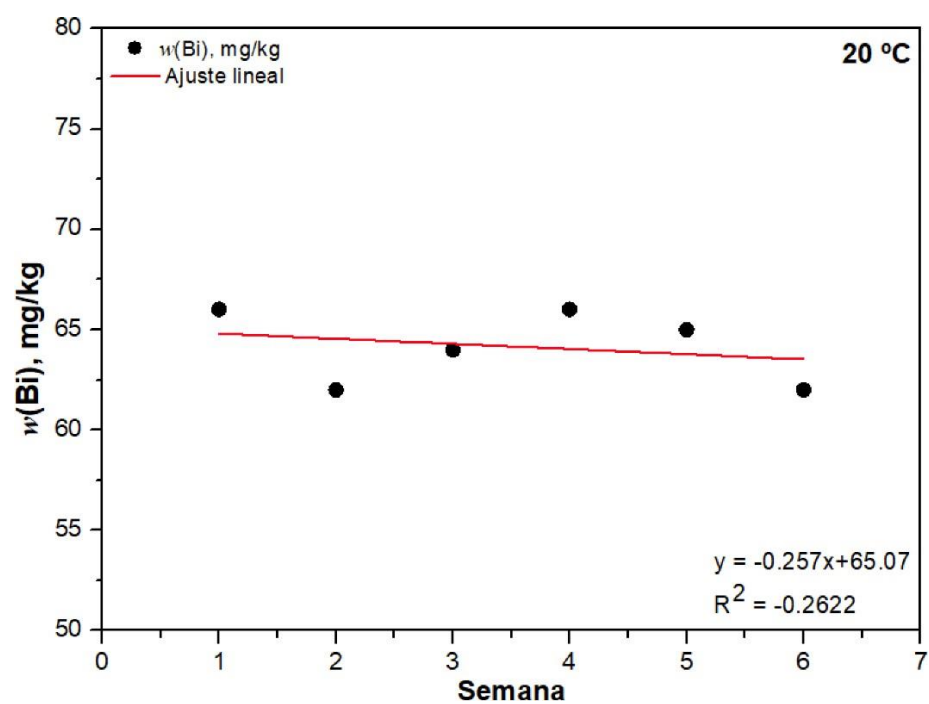


Figura 8. Estabilidad de $w(\text{Bi})$ en las muestras de concentrado de cobre (CMR-6200675b) a 20 °C a las 6 semanas de estudio.

Cuadro 7. Fracción de masa de bismuto $w(\text{Bi})$.

Semana	$w(\text{Bi})$, mg/kg
1	63
2	61
3	59
4	68
5	65
6	59

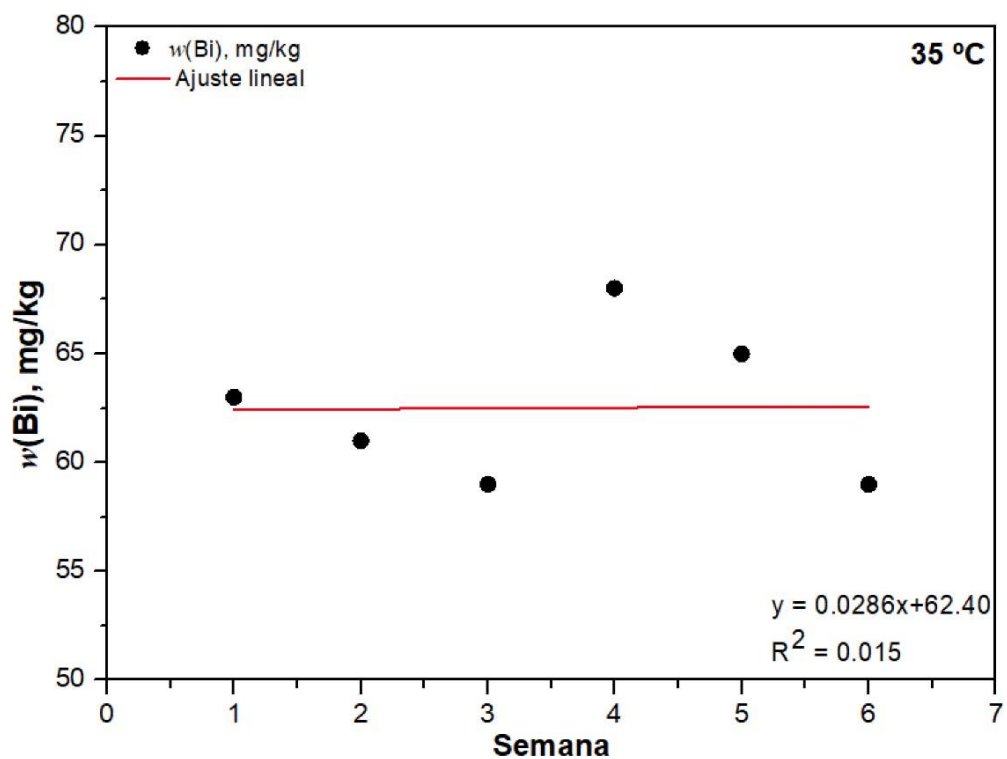


Figura 9. Estabilidad de $w(\text{Bi})$ en las muestras de concentrado de cobre (CMR-6200675b) a 35 °C a las 6 semanas de estudio.

Cuadro 8. Fracción de masa de bismuto $w(\text{Bi})$.

Semana	$w(\text{Bi})$, mg/kg
1	62
2	66
3	62
4	62
5	61
6	64

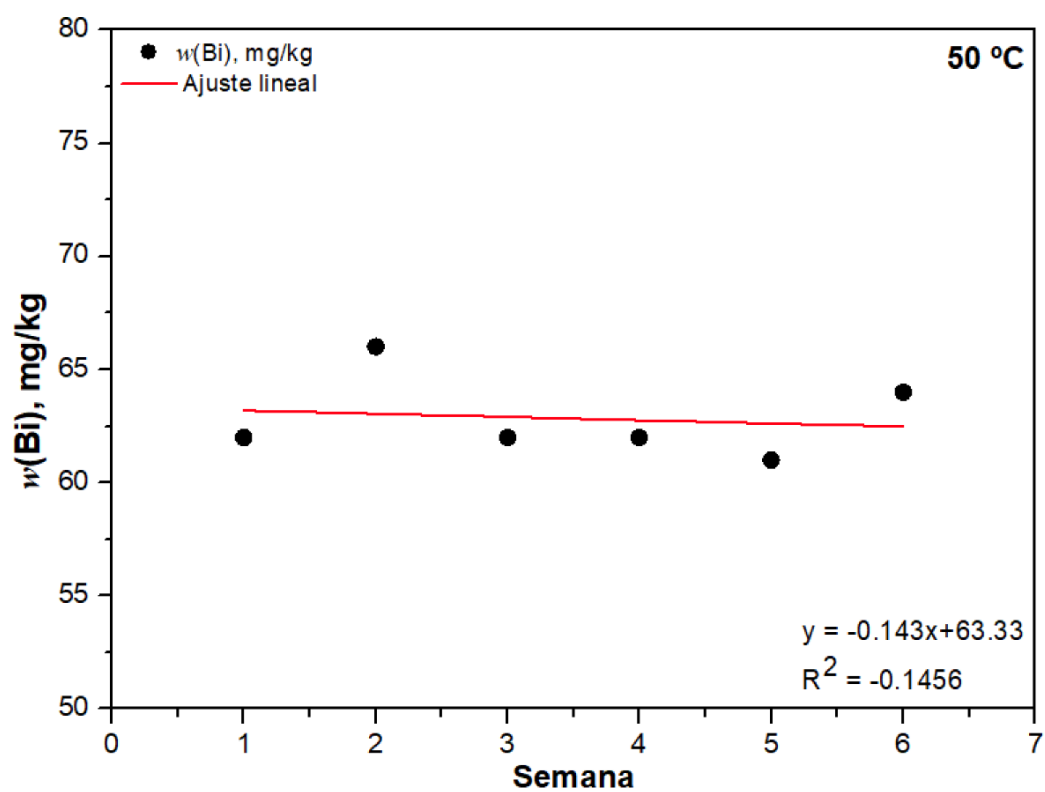


Figura 10. Estabilidad de $w(\text{Bi})$ en las muestras de concentrado de cobre (CMR-6200675b) a 50 °C a las 6 semanas de estudio.

El Cuadro 9 muestra un ejemplo de cómo se llevó a cabo la obtención de los parámetros estadísticos mediante el método de análisis de varianza de regresión lineal para cada conjunto de datos de la medición de la fracción de masa del bismuto por la técnica de ICP-SMFS mediante el análisis de la prueba estadística de t -Student se obtuvo el valor de 0.7 y 2.45 para su valor crítico, los valores anteriores son comparados con el fin de evaluar la estabilidad o no de la fracción de masa de bismuto medida.

También se puede observar en el Cuadro 9 un ejemplo de la realización de la prueba estadística del valor de p el cual nos permitió evaluar que no existen diferencias significativas en los valores de la fracción de masa de bismuto medidas al comparar el valor de probabilidad de 0.516 contra el valor de alfa de 0.05.

En el Cuadro 10 es posible observar los valores obtenidos de la pendiente del módulo de regresión lineal y la desviación estándar de la pendiente del modelo de regresión lineal con los cuales se obtuvo t_{b_1} que fue de 0.7. También en el Cuadro 10 es posible observar la comparación del valor de probabilidad obtenido del análisis de varianza que fue de 0.516. A partir de la prueba t -Student se determinó que la pendiente es menor que 0 con un nivel de confianza del 95 %, por lo que se puede inferir que la fracción de masa del elemento $w(\text{Bi})$ es estable al tiempo del estudio realizado. A partir de la prueba estadística del valor de p se determinó que p es mayor que el valor umbral predefinido α , por lo tanto, no hay diferencias significativas en los valores de la fracción de masa del elemento $w(\text{Bi})$, por lo que el valor del mensurando a certificar es estable en el tiempo de estudio realizado.

En el Cuadro 11 se muestra el valor de incertidumbre asociado a la estabilidad de los valores de la fracción de masa del elemento $w(\text{Bi})$.

Cuadro 11. Vida útil en relación con la estabilidad a largo plazo.

s_{b_1}	0.332
$t = \text{tiempo en semanas}$	6
$u_{Est} = 1s_{b_1} \cdot t$	1.99 mg/kg

Cuadro 9. Método de análisis de varianza de regresión lineal.

Estadísticas de la Regresión						
Coeficiente de correlación múltiple			0.33498			
Coeficiente de determinación R ²			0.11221			
R ² ajustado			-0.10974			
Error típico			1.38860			
Observaciones			6			
Análisis de Varianza						
	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	<i>F</i>	Valor crítico de <i>F</i>	
Regresión	1	0.97486	0.97486	0.50558	0.51633	
Residuos	4	7.71288	1.92822			
Total	5	8.68774				
	Coeficientes	Error típico	Estadístico <i>t</i>	Probabilidad <i>p</i>	Inferior 95 %	Superior 95 %
Intercepción	249.55	1.293	193.044	4.319E-09	245.96	253.141
Variable X1	0.2360	0.332	0.7110	0.5163	-0.685	1.1576

Cuadro 10. Prueba estadística t -Student y del valor de p .

t -Student		Probabilidad p	
sb_1	0.332	p	0.516
$t_{0.95 \ n-2}$	2.45	α	0.05
$ b_1 $	0.2360		
$t_{b_1} = \frac{ b_1 }{s_{b_1}}$	0.7		

4.2 Estudio de estabilidad de la fracción de masa de $w(\text{As})$

4.2.1 Curva de calibración $w(\text{As})$

En el Cuadro 12 se muestra la curva de calibración identificada como MR (material de referencia calibrador) empleada en el cálculo de fracción de masa de arsénico $w(\text{As})$ en las muestras del concentrado de cobre, la cual fue medida considerando la fracción de masa del isótopo ^{75}As por la técnica de ICP-SFMS. Se obtuvo una curva de calibración para cada medición la cual se puede observar en la Figura 11.

Cuadro 12. Curva de calibración $w(\text{As})$ ICP-SMFS.

MR	$I(\text{As})$ (cps)
1	87 227
2	116 326
3	141 434
4	173 460
5	195 589
6	212 779

El valor de R^2 fue de 0.9962 para la medición de la curva de calibración mediante la técnica ICP-SFMS considerando la fracción de masa del isótopo ^{75}As , como se puede observar en la Figura 11. Lo anterior indica que el modelo de regresión utilizado se ajusta a los datos reales, este coeficiente de determinación también indica la precisión general del modelo (Medlin y col., 2024).

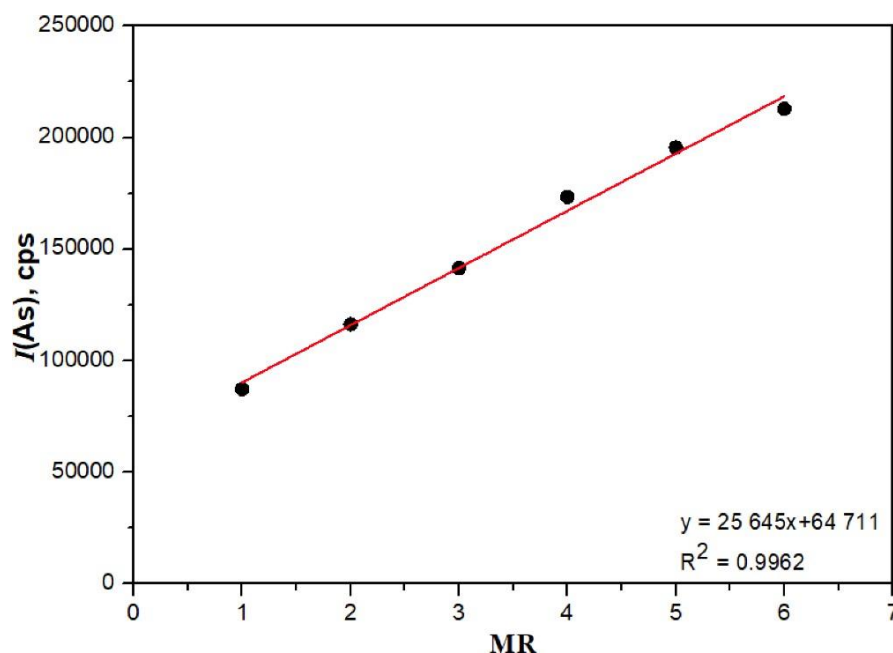


Figura 11. Curva de calibración $w(\text{As})$ de la secuencia de medición por ICP-SMFS.

En las mediciones de arsénico se aplicó el factor de corrección por deriva ya que hubo un impacto significativo en la deriva instrumental. La deriva es la variación continua o que se incrementa de una medición a lo largo del tiempo, lo anterior debido a variaciones de las características metrológicas de un instrumento de medición.

4.2.2 Medición de la fracción de masa de As por ICP-SFMS

En las Figuras 12, 13 y 14 se muestran los gráficos de la medición de la fracción de masa de arsénico $w(\text{As})$ medidas por la técnica de ICP-SMFS empleando el isótopo ^{75}As , para cada una de las 18 muestras sometidas a las diferentes temperaturas de 20, 35 y 50 °C. Las mediciones de la fracción de masa de arsénico $w(\text{As})$ se realizaron aplicando el factor de deriva instrumental y aplicando el criterio de los datos obtenidos con mayor precisión de acuerdo a lo mencionado en la sección B.3.4 de la Guía ISO 35:2017. En las Figuras 12, 13 y 14 es posible identificar los valores de los coeficientes de variación, así como la pendiente de la ecuación obtenida de la regresión lineal.

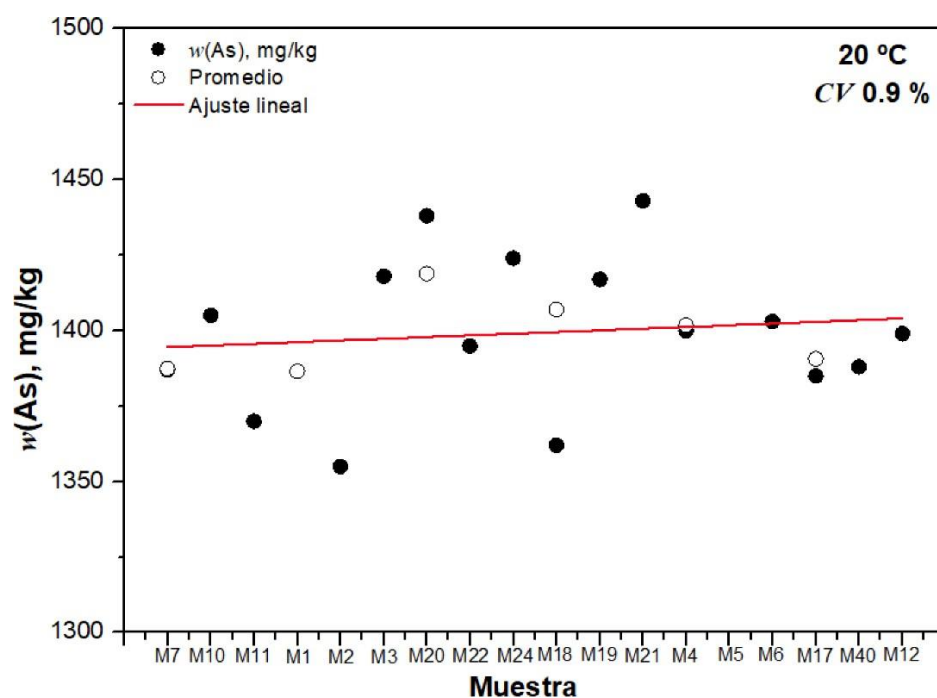


Figura 12. Fracción de masa de arsénico $w(\text{As})$ para las muestras de concentrado de cobre (CMR-6200675b) a 20 °C a las 6 semanas de estudio.

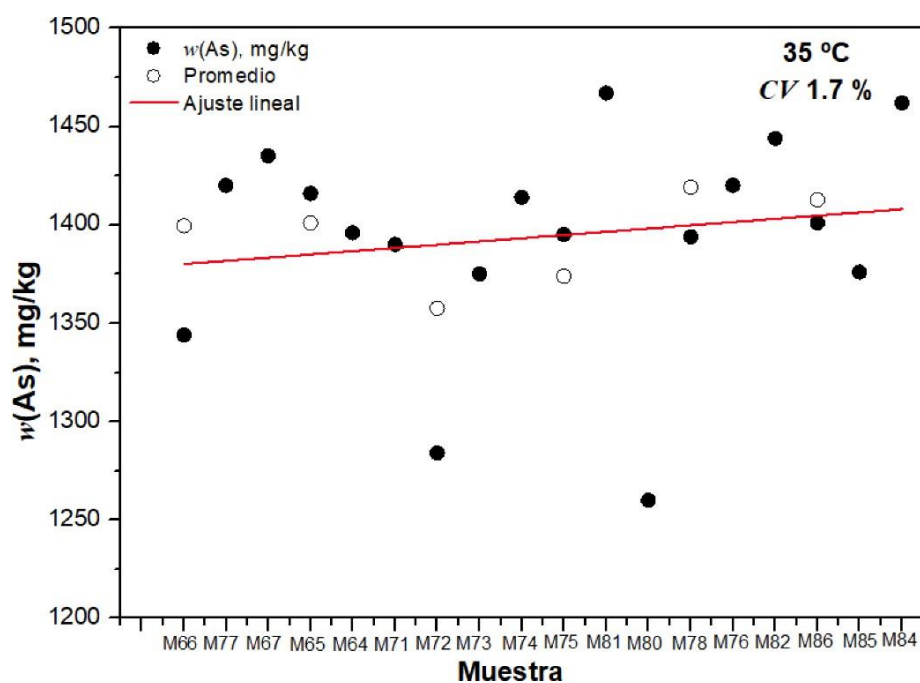


Figura 13. Fracción de masa de arsénico $w(\text{As})$ para las muestras de concentrado de cobre (CMR-6200675b) a 35 °C a las 6 semanas de estudio.

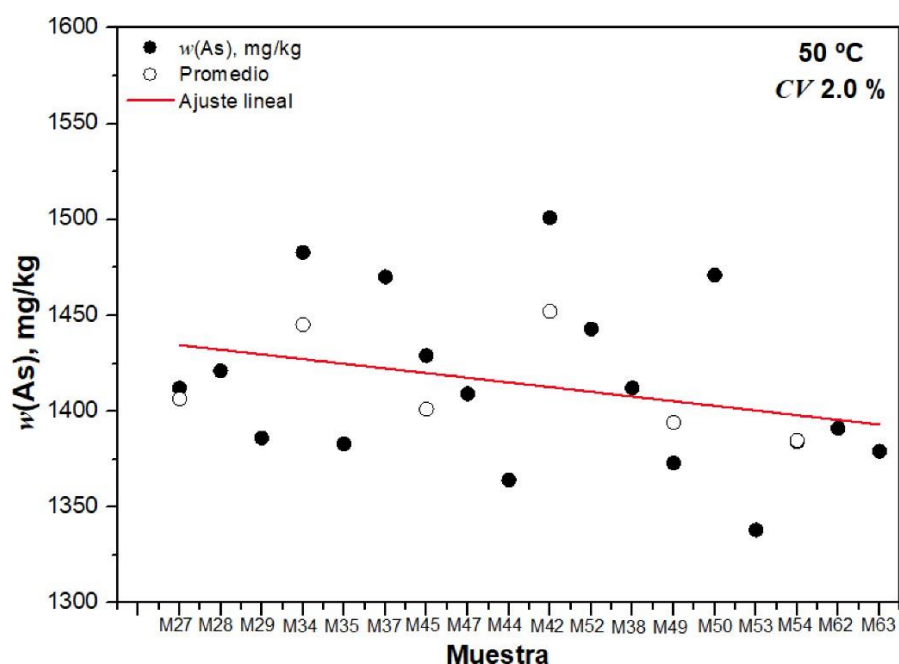


Figura 14. Fracción de masa de arsénico $w(\text{As})$ para las muestras de concentrado de cobre (CMR-6200675b) a 50 °C a las 6 semanas de estudio.

Los valores del coeficiente de variación fueron de 0.97 %, 1.7 % y 2.0 % medidos a las temperaturas de (20, 35 y 50) °C, respectivamente. Se observa que a la temperatura de 20 °C existe una menor dispersión de las fracciones de masa de arsénico con respecto a las otras.

4.2.3 Estimación de la estabilidad para As a diferentes temperaturas

En los Cuadros 13, 14 y 15 se muestra la fracción de masa de arsénico $w(\text{As})$ en el concentrado de cobre considerando la fracción de masa del isótopo ^{75}As por la técnica de ICP-SMFS a lo largo del estudio isócrono de seis semanas y en las Figuras 15, 16 y 17 se muestran las tendencias de la fracción de masa de arsénico $w(\text{As})$ en el concentrado de cobre a temperaturas de 20, 35 y 50 °C.

Cuadro 13. Fracción de masa de arsénico $w(\text{As})$.

Semana	$w(\text{As})$, mg/kg
1	1 387
2	1 386
3	1 419
4	1 407
5	1 402
6	1 391

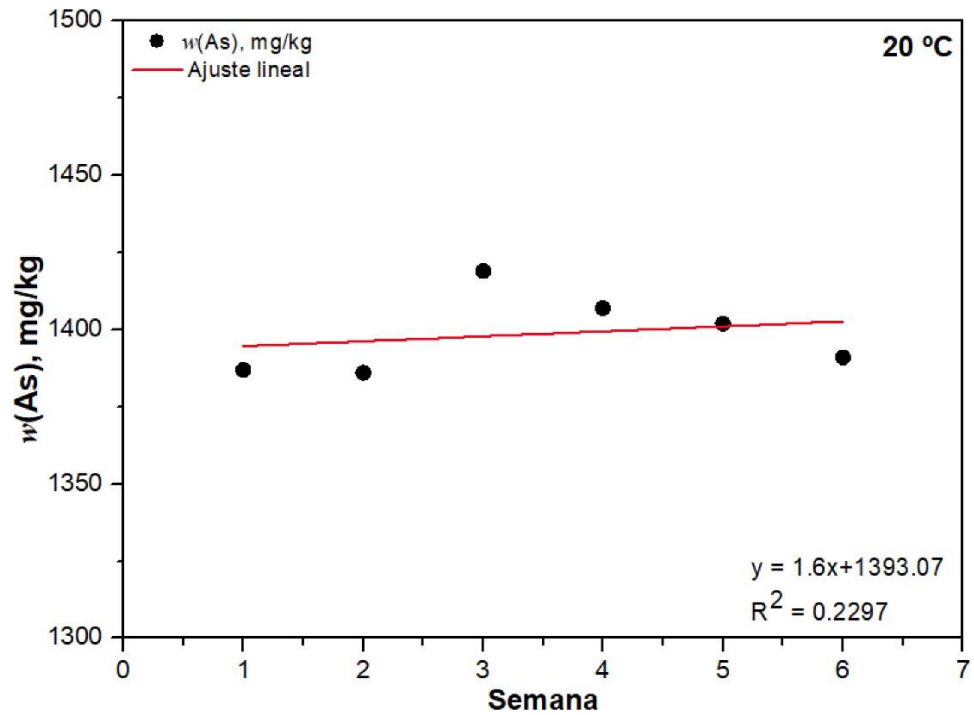


Figura 15. Estabilidad de $w(\text{As})$ en las muestras de concentrado de cobre (CMR-6200675b) a 20 °C a las 6 semanas de estudio.

Cuadro 14. Fracción de masa de arsénico $w(\text{As})$.

Semana	$w(\text{As})$, mg/kg
1	1 400
2	1 401
3	1 358
4	1 374
5	1 419
6	1 413

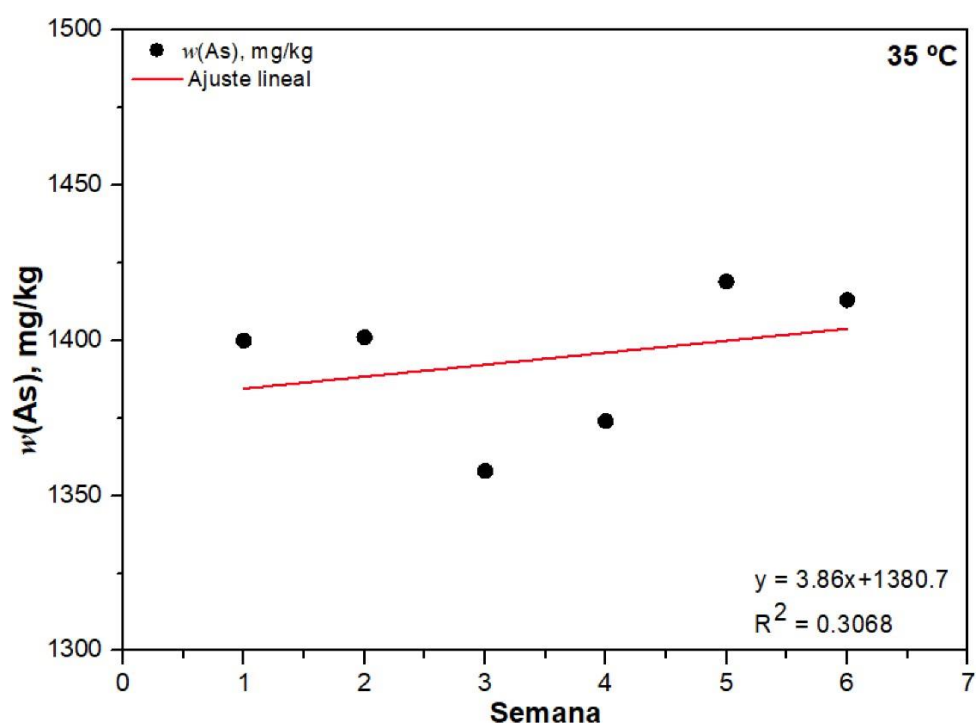


Figura 16. Estabilidad de $w(\text{As})$ en las muestras de concentrado de cobre (CMR-6200675b) a 35 °C a las 6 semanas de estudio.

Cuadro 15. Fracción de masa de arsénico $w(\text{As})$.

Semana	$w(\text{As})$, mg/kg
1	1 406
2	1 445
3	1 401
4	1 452
5	1 394
6	1 385

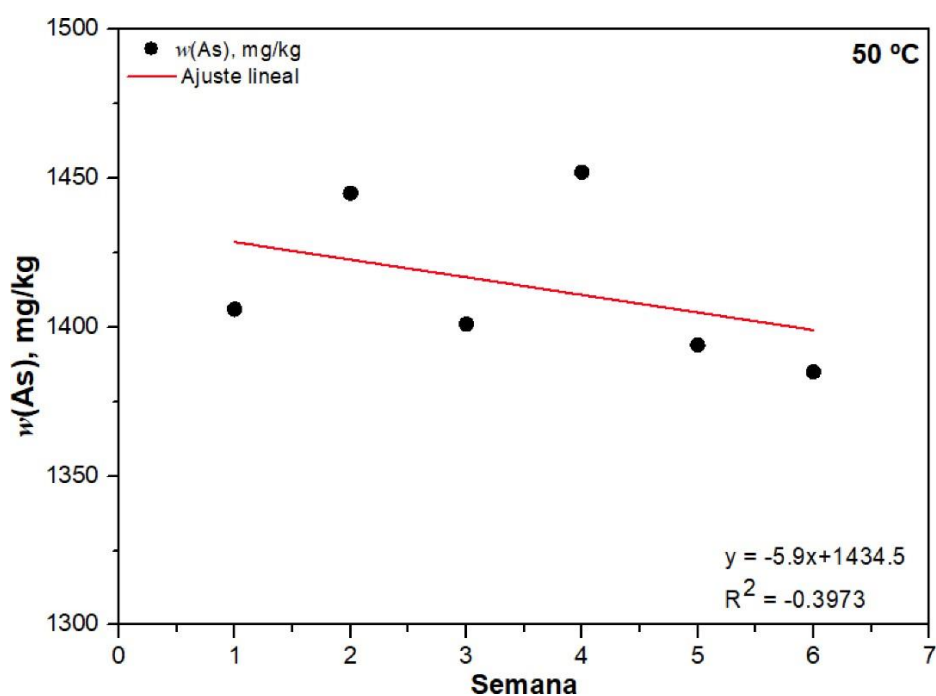


Figura 17. Estabilidad de $w(\text{As})$ en las muestras de concentrado de cobre (CMR-6200675b) a 50 °C a las 6 semanas de estudio.

El Cuadro 16 muestra un ejemplo de cómo se llevó a cabo la obtención de los parámetros estadísticos mediante el método de análisis de varianza de regresión lineal para cada conjunto de datos de la medición de la fracción de masa del arsénico por la técnica de ICP-SMFS, mediante el análisis de la prueba estadística de *t*-Student se obtuvo el valor de 2.2 y 2.45 para su valor crítico, los valores anteriores son comparados con el fin de evaluar la estabilidad o no de la fracción de masa de arsénico medida.

También se puede observar en el Cuadro 16 un ejemplo de la realización de la prueba estadística del valor de *p* el cual nos permitió evaluar que no existen diferencias significativas en los valores de la fracción de masa de arsénico medidas al comparar el valor de probabilidad de 0.094 contra el valor de alfa de 0.05.

En el Cuadro 17 es posible observar los valores obtenidos de la pendiente del módulo de regresión lineal y la desviación estándar de la pendiente del modelo de regresión lineal con los cuales se obtuvo t_{b_1} que fue de 2.2. También en el Cuadro 17 es posible observar la comparación del valor de probabilidad obtenido del análisis de varianza que fue de 0.094. A partir de la prueba *t*-Student se determinó que la pendiente es menor que 0 con un nivel de confianza del 95 %, por lo que se puede inferir que la fracción de masa del arsénico $w(\text{As})$ es estable al tiempo del estudio realizado. A partir de la prueba estadística del valor de *p* se determinó que *p* es mayor que el valor umbral predefinido α , por lo tanto, no hay diferencias significativas en los valores de la fracción de masa del elemento $w(\text{As})$, por lo que el valor del mensurando a certificar es estable en el tiempo de estudio realizado.

En el Cuadro 18 se muestra el valor de incertidumbre asociado a la estabilidad de los valores de la fracción de masa del elemento $w(\text{As})$.

Cuadro 18. Vida útil en relación con la estabilidad a largo plazo.

s_{b_1}	0.3577
t = tiempo en semanas	6
$u_{Est} = 1s_{b_1} \cdot t$	2.15 mg/kg

Cuadro 16. Método de análisis de varianza de regresión lineal.

Estadísticas de la Regresión						
Coeficiente de correlación múltiple			0.73849			
Coeficiente de determinación R ²			0.54538			
R ² ajustado			0.43172			
Error típico			1.49635			
Observaciones			6			
Análisis de Varianza						
	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	<i>F</i>	Valor crítico de <i>F</i>	
Regresión	1	10.7444	10.7444	4.7985	0.0936	
Residuos	4	8.9562	2.2390			
Total	5	19.7007				
	Coeficientes	Error típico	Estadístico <i>t</i>	Probabilidad <i>p</i>	Inferior 95 %	Superior 95 %
Intercepción	249.9560	1.393	177.27	6.07E-09	243.08	250.82
Variable X1	0.7835	0.357	2.1905	0.0936	-0.209	1.776

Cuadro 17. Prueba estadística t -Student y del valor de p .

t -Student		Probabilidad p	
s_{b_1}	0.3577	p	0.094
$t_{0.95 \ n-2}$	2.45	α	0.05
$ b_1 $	0.7835		
$t_{b_1} = \frac{ b_1 }{s_{b_1}}$	2.2		

5. CONCLUSIONES

El estudio isócrono realizado logró predecir la estabilidad de As y Bi en un tiempo estimado a corto plazo, y con ayuda del modelo matemático (regresión lineal y ANOVA) se pudo predecir el comportamiento de los elementos en un mayor tiempo a largo plazo.

Se determinó que las fracciones de masa $w(\text{As})$ y $w(\text{Bi})$ correspondientes en las muestras en las diferentes temperaturas 20, 35 y 50 °C, fueron estables, sin embargo, se observa que en el intervalo de temperatura de (20 ± 3) °C y (35 ± 3) °C, son mas estables, se recomienda que las temperaturas anteriormente mencionadas sean empleadas para condiciones de transporte y almacenamiento del material de referencia certificado de concentrado de cobre. Así mismo, es importante dar seguimiento a los estudios de estabilidad clásico a largo plazo, que consiste en realizar mediciones periódicas, lo anterior para estimar la estabilidad a mayor tiempo, con lo cual se podría predecir con mayor precisión el tiempo de vida útil del material de referencia.

El estudio de estabilidad isócrono, de corto plazo empleando el método de análisis de varianza de regresión lineal fue satisfactorio para estimar la estabilidad a largo plazo de la $w(\text{Bi})$ y $w(\text{As})$. La incertidumbre estimada de estabilidad a las seis semanas de estudio fue para $u[w(\text{Bi})] = 1.99 \text{ mg/kg}$ y $u[w(\text{As})] = 2.15 \text{ mg/kg}$. El valor de la estimación de la incertidumbre asociada a la estabilidad se determinó por ambos modelos: modelo de regresión lineal (clásico) y predicción por el modelo de regresión lineal, lo que indica que los dos modelos son adecuados para ser empleados en la determinación de la incertidumbre de la estabilidad de los materiales de referencia, dando un valor menor a 0 en el análisis matemático (ANOVA), mostrando estabilidad, lo que nos demuestra que la implementación de cualquiera de los modelos matemáticos dependerá del objeto de estudio.

El estudio de estabilidad realizado al MRC de concentrado de cobre permitió la certificación de este material que ha sido identificado como CRM-6200675b, cuyo origen fue el Centro Nacional de Metrología (CENAM).

6. BIBLIOGRAFÍA

- CENAM. (2023). Centro Nacional de Metrología: Historia y Misión. Recuperado de <https://www.cenam.mx>.
- Gómez, L. y Martínez, R. (2020). La metrología en México: Desafíos y avances. Editorial Nacional de Metrología. ISBN 978-987-1234-56-7.
- López, A. y Vargas, M. (2022). Metrología y patrones de referencia: Un enfoque global. *Metrology Review*, 15(3), 45-60. <https://doi.org/10.1007/s12345-022-6789-0>
- Hernández, J., Ramírez, P., y Soto, F. (2021). Patrones nacionales y su impacto en la precisión de las mediciones. *Journal of Measurement Science*, 34(2), 123-135. <https://doi.org/10.1016/j.jms.2021.05.012>
- Martínez, A., Pérez, J., y Gómez, H. (2021). El uso de patrones de referencia concentrados de cobre en la industria de metales. *Metallurgical Journal*, 29(4), 299-310. <https://doi.org/10.1016/j.metj.2021.04.007>
- García, F., y Pérez, M. (2023). Estándares de referencia para la conductividad eléctrica: El caso del cobre. *International Journal of Conductivity*, 18(1), 76-89. <https://doi.org/10.1016/j.ijcon.2023.01.014>
- Kumar, A., Singh, R., y Yadav, S. (2020). "Effect of Trace Elements on the Physical and Chemical Properties of Copper." *Journal of Materials Science and Engineering*, 12(4), 453- 468.
- Smith, T., y Johnson, L. (2021). "Improving Machinability of Copper Alloys through the Addition of Bismuth." *Materials Science Forum*, 1007, 29-37.
- Li, X., Wang, J., y Zhang, Y. (2022). "Precision Monitoring of Trace Elements in Certified Reference Materials for Copper." *Analytical Chemistry Review*, 15(1), 120-135.
- G. P. S., y H. T. K. (2022). La evolución histórica de la metrología y sus implicaciones modernas. *Revista Internacional de Metrología*, 15(2), 123-135.
- Smith, J. D. (2020). Metrology and the Industrial Revolution: The birth of precision. *Industrial History Review*, 27(1), 45-59.
- TSI. (2021). The role of metrology in modern science and industry. Thermo Scientific. Recuperado de <https://www.thermofisher.com/metrology>.

Joint Committee for Guides in Metrology. (2012). Vocabulario Internacional de Metrología. Conceptos fundamentales y generales, y términos asociados. España: Centro Español de Metrología.

Centro Nacional de Metrología. (25 de Octubre de 2018). GOBIERNO DE MÉXICO. Obtenido de <https://www.gob.mx/cenam/acciones-y-programas/patrones-nacionales>.

Centro Nacional de Metrología. (17 de Septiembre de 2018). GOBIERNO DE MÉXICO. Obtenido de <https://www.gob.mx/cenam/articulos/que-son-los-materiales-de-referencia-certificados>.

Consultores en Metrología y Calidad. (08 de Septiembre de 2019). MC consultores. Obtenido de <https://metrologiaycalidad.com/2019/09/08/importancia-de-la-metrologia-en-el-control-de-calidad/>

ENAC & Centro Español de Metrología. (2015). Uso del concepto de trazabilidad metrológica por los laboratorios de calibración. Entidad Nacional de Acreditación. Recuperado de <https://www.enac.es/documents/10180/0/Concepto+de+trazabilidad+metrol%C3%B3gica+por+los+laboratorios+de+calibraci%C3%B3n/1f4fc7c6-8a87-4338-a817-d5c65080b9b5>.

Domon, B., y Aebersold, R. (2006). Mass spectrometry and protein analysis. *Science*, 312(5771), 212-217.

Fenn, J. B., Mann, M., Meng, C. K., y Whitehouse, C. M. (1989). Electrospray ionization for mass spectrometry of large biomolecules. *Science*, 246(4926), 64-71.

Ghassempour, A., y Khodadadi, A. (2020). Applications of mass spectrometry in forensic science: A review. *Forensic Science International*, 307, 110172.

Chiaramonti, D., y Gatti, M. (2015). Copper metallurgy: From the ancient world to modern applications. *Journal of Materials Science*, 50(21), 6791-6804.

Wang, Y., y Xu, G. (2017). Influence of bismuth on the properties of copper alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 685, 213-221.

Iyer, S. S., y Mohan, K. (2019). Arsenic management in copper production: Current practices and challenges. *Journal of Cleaner Production*, 217, 1013-1023.

Alonso, P. B (2015). Estudio de estabilidad de plaguicidas en vegetales y frutas. *Laboratorio de Residuos Agroquimicos Costa Rica. Pensamineto Actual*, 15(25), 197-205.

Atkins, P. W., y de Paula, J. (2010). *Physical chemistry* (9th ed.). Oxford

University Press. Ghosh, P. (2017). Stability of chemical compounds: An overview. *International Journal of Advanced Research in Chemical Science*, 4(6), 1-10.

Skoog, D. A., West, D. M., Holler, F. J., y Crouch, S. R. (2014). *Fundamentals of analytical chemistry* (9th ed.). Cengage Learning.

Wang, Y., y Xu, H. (2019). A review of the applications of ICP-MS in the analysis of trace elements. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 34(1), 1-22.