



**Facultad de Ingeniería**

**Carrera de Ingeniería Industrial**

**TRABAJO DE INVESTIGACIÓN PARA OPTAR POR EL GRADO  
ACADÉMICO DE BACHILLER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL**

**Diseño de un prototipo de kit colorimétrico basado en la reacción de  
azometina-H para determinar boro en aguas**

**Autores**

Aimetoma Quiroz, Katherine Kelly (1512634)  
Paredes Murillo, Carlos Manuel (U17104676)

**Docentes**

Gonzales Condori, Elvis Gilmar  
Ramírez Revilla, Stamber Alvaro

Arequipa, Perú  
Diciembre - 2020

## Índice general

Resumen .....	1
1. Problema de investigación .....	2
2. Objetivo general y específicos .....	3
3. Revisión de la literatura actual .....	4
4. Marco teórico.....	10
4.1. Boro .....	10
4.2. Métodos analíticos para determinar boro en agua .....	12
4.3. Sensores colorimétricos .....	13
4.4. Kit colorimétrico .....	15
4.5. Costos de producción, gastos y determinación de precios .....	15
5. Metodología de la investigación .....	18
5.1. Tipo de investigación.....	18
5.2. Nivel de investigación.....	18
5.3. Variables .....	18
5.4. Instrumentos de investigación.....	18
5.5. Procedimiento de recolección de datos .....	19
6. Resultados y discusión.....	27
6.1. Pruebas preliminares .....	27
6.2. Curva de calibración .....	28
6.3. Elaboración de la escala de color.....	31
6.4. Diseño del kit colorimétrico.....	33
6.5. Evaluación económica .....	34
7. Conclusiones y recomendaciones.....	40

## **Índice de tablas**

Tabla 1 Métodos espectrofotométricos para determinar boro en agua. ....	13
Tabla 2 Absorbancia promedio, desviación estándar y coeficiente de variación.....	29
Tabla 3 Valores para calcular el límite de detección y cuantificación. ....	31
Tabla 4 Cantidad de reactivos.....	34
Tabla 5 Precios de reactivos en tiendas de internet y distribuidores locales.....	35
Tabla 6 Precios unitarios de reactivos. ....	35
Tabla 7 Costo total para preparar 100 mL de solución de azometina-H 0.9% y ácido ascórbico 2%. ....	35
Tabla 8 Costo total para preparar 250 mL de solución tampón pH 5.9. ....	35
Tabla 9 Costo total de la estructura el kit. ....	36
Tabla 10 Costo total de los materiales.....	37
Tabla 11 Cantidad de veces que se podría preparar 100 mL de la solución de azometina-H en función de cada reactivo. ....	38
Tabla 12 Cantidad de veces que se podría preparar 250 mL de la solución tampón en función de cada reactivo.....	38
Tabla 13 Costo de soluciones para 80 kits colorimétricos.....	39

## Índice de figuras

Figura 1. Escala de color que muestra la concentración de $\text{Fe}^{2+}$ en volúmenes variables de soluciones acuosas.....	14
Figura 2. (A) Kit con disco comparador, (B) kit con tarjeta colorimétrica y (C) kit con comparador deslizable. ....	15
Figura 3. Estructura para tomar fotografías (diseño 3D). ....	20
Figura 4. Estructura para tomar fotografías mostrando el papel retroiluminado (diseño 3D).....	20
Figura 5. Metodología para la preparación de soluciones. ....	21
Figura 6. Estructura para tomar fotografías.....	22
Figura 7. Estructura inicial (A) y estructura final (B). ....	27
Figura 8. Fotografía utilizando iluminación artificial en la estructura inicial (A) y fotografía utilizando iluminación posterior en la estructura final (B).....	28
Figura 9. Fotografías de las celdas de cuarzo con la solución de la bebida carbonatada. ....	28
Figura 10. Curva de calibración.....	30
Figura 11. Concentración de boro vs desviación estándar.....	30
Figura 12. Escala de color con recortes en forma rectangular.....	31
Figura 13. Escala de color con recortes en forma rectangular mostrando la celda de cuarzo.....	31
Figura 14. Muestra de agua contaminada con boro comparada con el resto de concentraciones. ....	32
Figura 15. Escala de color en forma de abanico. ....	32
Figura 16. Diseño en 3D del prototipo de kit colorimétrico. ....	33

## Resumen

El objetivo del presente trabajo de investigación fue diseñar un prototipo de kit colorimétrico a base de azometina-H que permita determinar boro en aguas. Se prepararon soluciones con concentraciones de boro de 0 a 8 mg/L que fueron analizadas por el método espectrofotométrico. Se elaboró una estructura para tomar de fotografías del complejo de azometina-H y boro utilizando una cámara Panasonic Lumix FZ2000. Las fotografías tomadas se emplearon para elaborar la escala de color; asimismo, se diseñó el kit colorimétrico en 3D el cual incluye la escala en mención. La curva de calibración del método espectrofotométrico presentó un coeficiente de correlación de 0.9997 lo que indicó una buena linealidad del método empleado. La escala de color se imprimió a láser en papel *couché*. Finalmente se diseñó kit colorimétrico y se realizó una evaluación económica del mismo, logrando determinar su precio de venta.

**Palabras clave:** Kit colorimétrico, espectrofotometría, boro, azometina-H

## 1. Problema de investigación

El boro es un micronutriente importante para el desarrollo y crecimiento de las plantas [1]; sin embargo, puede causarles daño dependiendo del tiempo de exposición, las condiciones del suelo, la sensibilidad del cultivo y el uso de agua de riego. La concentración de boro en el agua para irrigar los cultivos depende del tipo de planta y las características del suelo [2]. Por ello, es necesario monitorear la cantidad de boro en agua de forma periódica.

El valle de Tambo, ubicado en el departamento de Arequipa, en la provincia de Islay, es una zona agrícola que utiliza el río Tambo como fuente de agua para irrigar los cultivos. Según estudios realizados en las aguas del río en mención, se ha encontrado niveles elevados de boro que superan el estándar de calidad ambiental (ECA) para el agua de riego de vegetales que es 1 mg/L [3]. Buscando reducir los impactos negativos en los cultivos, es de vital importancia analizar la concentración de boro en aguas de riego de zonas agrícolas.

Actualmente existen diferentes métodos que permiten determinar la cantidad de boro presente en el agua, pero los más utilizados son los métodos espectrofotométricos que utilizan reactivos como azometina-H, curcumina, ácido carmínico, entre otros [4].

Para el monitoreo de muestras de agua en campo, se están desarrollando kits colorimétricos de fácil manejo y bajo costo, que tienen resultados similares a las pruebas realizadas en laboratorio. Por esta razón, el presente trabajo de investigación propone una alternativa para determinar boro *in situ*, lo que hará posible garantizar la cantidad adecuada de este elemento al momento de irrigar los cultivos, asegurando además, productos de calidad en los valles de Arequipa.

### **Formulación del problema de investigación**

¿De qué manera el diseño de un prototipo de kit colorimétrico a base de azometina-H permitirá determinar boro en aguas?

## **2. Objetivo general y específicos**

### **2.1. Objetivo general**

Diseñar un prototipo de kit colorimétrico a base de azometina-H que permita determinar boro en aguas.

### **2.2. Objetivos específicos**

- Elaborar una estructura para tomar fotografías del complejo coloreado generado a partir de la reacción entre la azometina-H y el boro.
- Analizar e imprimir una escala colorimétrica a partir de las fotografías del complejo azometina-H y boro a diferentes concentraciones.
- Diseñar el prototipo de un kit basado en el complejo de color de azometina-H y boro.
- Realizar una evaluación económica del prototipo del kit colorimétrico propuesto.

### **3. Revisión de la literatura actual**

En 2018, Sapkota y otros, observaron en Montana, que la deficiencia de boro en el suelo no es un factor determinante para aplicar fertilizantes de boro (B) en campos irrigados de alfalfa, y de esta manera ahorrar costos relacionados a esa aplicación. Aplicaron B en 3 cantidades diferentes para las zonas de campo seleccionadas y preparadas en Dillon y Creston (10 x 15 pies), en donde los suelos tenían un nivel de B inicial de 0.8 ppm y 0.2 - 0.3 ppm, respectivamente. Considerando la temperatura y las condiciones climáticas de las zonas, se utilizó una aplicación foliar de una solución líquida de boro al 10 %. Luego de un análisis de dos años, utilizando métodos de química húmeda, se encontró que el rendimiento de materia seca del suelo y la calidad de la alfalfa no tuvieron cambios significativos en las diferentes zonas de prueba. Por ésta razón, realizar pruebas de suelo no es una forma confiable de determinar las cantidades de B a ser aplicadas en los cultivos de alfalfa [5]

Ghasemidehkordi y otros, en 2018, identificaron que las cantidades de semimetales que provienen de la industria pesada en Irán, como boro y arsénico, son absorbidos del agua y suelo por las Verduras de Hoja Verde (GLV por sus siglas en inglés) siendo un riesgo para la salud de las personas. Tomaron muestras de GLV como puerro, espinacas, fenogreco, entre otros; y además, muestras de agua de riego y suelos cercanos a las zonas de cultivo. Determinaron las concentraciones de boro y arsénico con un espectrofotómetro de emisión óptica de plasma acoplado inductivamente (ICP-OES), encontrándose que las cantidades de boro fueron inferiores a las de arsénico en el agua de riego. En el caso de GLV, el fenogreco tenía la mayor concentración de boro, y el puerro la mayor concentración de arsénico; sin embargo, la concentración de arsénico en todas las verduras superó el límite máximo permitido. Esto indica que GLV absorben semimetales del suelo y agua de riego de acuerdo al tipo de planta, siendo el arsénico absorbido en mayores cantidades [6].

Shah y otros, en su estudio realizado en China, en 2017, demuestran que el boro (B) afecta el crecimiento y metabolismo de las plantas cítricas, más aún cuando en éste país el B es escaso ocasionando una pérdida de calidad en los cítricos. Ellos realizaron un análisis durante 75 días para citranges administrando B en cantidades de 0  $\mu$ M (deficiencia de B), 100  $\mu$ M (exceso de B) y 10, 20 y 40  $\mu$ M (cantidad adecuada de B). Se encontró que la deficiencia y exceso de boro inhibían el crecimiento de la planta; además, se observó que en condiciones de toxicidad, las

hojas mostraron una clorosis amarillenta comenzado en los bordes y extendiéndose al resto de la hoja. Esto demuestra que hay plantas, como los cítricos, que son sensibles a la presencia de B; y es por ello que su aplicación en las cantidades adecuadas es muy importante para el desarrollo fisiológico, morfológico y bioquímico de las plantas [7].

En 2020, en China, Zhang y otros, realizaron un estudio que demuestra el desarrollo de nuevos métodos colorimétricos para identificar diferentes iones de metales pesados en una misma solución que pueden causar daños a la salud de las personas. Este nuevo método utiliza 2,3,4-trihidroxibenzaldehído rodamina B hidrazida hidrazona (REHBA), que en contacto con iones metálicos de cobalto ( $\text{Co}^{2+}$ ) y cobre ( $\text{Cu}^{2+}$ ), toma un coloración rosa; pero al reaccionar con iones de plomo ( $\text{Pb}^{2+}$ ) se visualiza una fuerte fluorescencia. A diferencia de algunos métodos colorimétricos que permiten identificar un solo ion metálico, el REHBA puede identificar a múltiples de ellos ( $\text{Co}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$  y  $\text{Pb}^{2+}$ ) sin presentar interferencias por la presencia de otros iones, convirtiéndose en una nueva alternativa más práctica y menos costosa que otras técnicas utilizadas [8].

Chatterjee y otros, en India, elaboraron en 2020, un nuevo quimiosensor para poder detectar iones fluoruro ( $\text{F}^-$ ) en un medio orgánico debido a las enfermedades que este puede causar en las personas. Este nuevo quimiosensor de azo-azometino, forma un complejo rosa instantáneamente al contacto con  $\text{F}^-$  o con el ion acetato ( $\text{AcO}^-$ ); además, al agregar nitrato de calcio al compuesto formado, la reacción se revierte, regenerando el azo-azometino. En comparación a otros métodos, éste muestra el mayor desplazamiento en la banda UV-visible con un valor de 186 nm. Por ello, el uso de este nuevo quimiosensor es una alternativa económica que no necesita equipo moderno [9].

Un estudio realizado en China, por Li y otros, en 2019, evidencia el desarrollo de nuevas formas para la detección colorimétrica de cianuro ( $\text{CN}^-$ ) en soluciones acuosas debido a su alta toxicidad y cantidad de usos en la industria. Han desarrollado un nuevo quimiosensor llamado azo-azometino L para recubrir tiras reactivas, que en contacto con soluciones acuosas que contenían  $\text{CN}^-$  formó complejos de color amarillo reconocibles a simple vista, mostrando una alta selectividad para éste ion. A diferencia de los métodos existentes, que son más costosos, tienen poca sensibilidad y selectividad, éste nuevo método es una alternativa que cubre esas necesidades [10].

En Tailandia, en el estudio realizado en 2019, por Choodum y otros, los polímeros biodegradables naturales se utilizaron por primera vez como sustrato para fabricar películas colorimétricas ecológicas para la detección de iones ferrosos. Ellos colocaron 1,10-fenantrolina (fen) en láminas de almidón de yuca para que sea posible realizar un análisis en campo, adicionalmente emplearon el análisis de imagen digital (DIC) para obtener resultados más precisos, con ello plantearon una nueva manera de analizar iones ferrosos sin utilizar un método espectrofotométrico. Luego de realizar el análisis con la película fen y DIC, y el método espectrofotométrico de absorción atómica (AAS) de las muestras de suelo alrededor de plantas de aceite de palma y de agua de un campo de arroz, los resultados encontrados fueron muy similares. Esto indica que el método con películas fen y DIC, al tener similitud en los resultados del AAS, es una alternativa más económica para realizar pruebas *in situ* [11].

El estudio de Xiong y otros, realizado en China, en 2016, pone en evidencia el desarrollo de nuevas maneras para detectar concentraciones de iones metálicos de cobre de forma rápida en soluciones acuosas que son utilizados por la industria y la agricultura de forma indiscriminada. El kit que desarrollaron, que utiliza un método colorimétrico, consta de tiras de papel filtro recubiertas con el compuesto llamado NTBL, que es producto de la reacción entre 4-aminoantipirina y pirrol-2-carboxaldehído; al entrar en contacto con soluciones que contienen aniones de cobre  $\text{Cu}^{2+}$  (con un límite de  $1.0 \times 10^{-5}$  M), las tiras de papel toman una coloración púrpura identificable a simple vista en menos de 16 minutos. En comparación con otros métodos colorimétricos, el que utiliza NTBL, tiene una respuesta más rápida, un mayor rango lineal de 0 a  $8.5 \mu\text{M}$ , y una buena sensibilidad de  $\text{Cu}^{2+}$ ; es por ello que este método puede ser utilizado para realizar muestreo en campo de forma sencilla [12].

En España, el estudio que Pena-Pereira y otros realizaron en 2020, demuestra que se están desarrollando nuevas formas para la detección colorimétrica de boro *in situ* a bajo costo. Ellos han elaborado dispositivos analíticos basados en papel (PAD) con curcumina como reactivo en conjunto con equipos de tecnología de información para cuantificar boro en muestras de agua. La reacción entre los PAD y las muestras con boro generó rosocianina en medio alcalino y luego, en un medio ácido, cambió de un color rojo a un complejo azul verdoso. Se encontró que el límite de detección y cuantificación tenían un rango de 0.2 a 0.8 mg/L y de 0.7 a 2.6 mg/L respectivamente; además, la repetitividad del método, expresada como desviación estándar relativa, fue menor a 5 %. Por otro lado, el tiempo de análisis encontrado

(menor a 1 minuto), fue inferior a otras metodologías aplicadas como la espectroscopia ultravioleta-visible con azometina-H (60 - 120 minutos) o con curcumina (105 minutos). Esto indica que el uso de PAD con tecnología de digitalización ofrece nuevas posibilidades para la identificación boro *in situ* de forma económica y rápida sin utilizar equipos sofisticados [13].

Boonkanon y otros, en Tailandia, en 2020, han desarrollado sensores más económicos y portables para poder detectar boro (B) en agua, porque identificando su concentración se puede determinar su origen y de esta forma no se tendrá que recurrir a métodos costosos para eliminar el B del agua. Elaboraron un nuevo sensor para detectar boro en agua a partir de nanopartículas de curcumina contenidas en una película de almidón de yuca (película curn) en conjunto con un método de colorimetría de imagen digital (DIC) para poder cuantificar el B en una solución. La película reaccionaba con soluciones que contenían B formando complejos marrón rojizos en un tiempo de 15 minutos a un pH de 9. Con muestras reales de agua de minas de estaño y de una planta procesadora de madera a partir de caucho, se realizó una comparación entre el método con películas curn y el método con espectrofotómetro de emisión óptica de plasma acoplado inductivamente (ICP-OES), encontrándose valores de  $4248 \pm 391$  mg/L y  $4870 \pm 13$  mg/L respectivamente, alcanzado una confiabilidad del 95 %. El precio de fabricación para la película curn fue de 0.004 USD. Es así que éste método se convierte en una excelente alternativa para poder realizar pruebas *in situ* de forma rápida y económica [14].

En Canadá, en 2017, Sabally y otros, han mejorado procedimientos anteriormente utilizados para determinar cantidades de boro (B) con azometina-H en tejidos vegetales para no tener que recurrir a métodos costosos. Ajustaron el método de microplacas para muestras de suelo y tejidos vegetales a un pH neutro de 7 para evitar interferencias. El ensayo de microplacas dio una repetitividad de 114.9 % y una consistencia entre días de 115.5 %. Se encontró que luego de comparar los resultados con el espectrómetro convencional UV-vis, había poca diferencia entre los valores; el porcentaje de similitud más bajo fue 95 %. Para un patrón de hoja de durazno (29.00  $\mu\text{g/g}$  de B), con el ensayo de microplacas se obtuvo un valor de  $28.55 \pm 0.34$   $\mu\text{g/g}$ , lo que indicaba una precisión de 98 %. Además, con el ensayo de microplacas se pueden tomar hasta 600 muestras al día, usando una cantidad de reactivo 40 veces menor que los métodos de espectrometría convencional. Es por ello que el ensayo de microplacas, permite un análisis simultáneo de muestras

de forma rápida, siendo una alternativa al uso del espectrómetro de plasma de acoplamiento inductivo (ICP) que es más costoso [15].

González y otros, en Montevideo, realizaron un estudio en 2017, que muestra un nuevo sistema automatizado para poder detectar boro en agua con azometina-H tomando muestras de forma más rápida y constante para situaciones en que sea necesario hacerlo. El sistema que consta de tres bombas de solenoide y un sensor fotométrico, tiene como principio el funcionamiento de métodos basados en flujo con detección espectrofotométrica; sin embargo, para este caso aplicaron un tiempo de flujo detenido y con pulsaciones para obtener una mejor reacción entre la azometina-H y las muestras de gotas para ojos, agua potable y agua de mar. Se encontró que el tiempo necesario para que la reacción sea adecuada fue de 4 minutos para la muestra de agua de mar y de 1 minuto para el resto de muestras; alcanzando a realizarse 10 muestras por hora y 32 muestras por hora, respectivamente. Además, la concentración adecuada de reactivo para este método fue de 0.6 %, con un límite de detección de 0.10 mg/L y con un límite de cuantificación de 0.35 mg/L. Se encontró una precisión de 3 %, un valor superior a otros métodos como el análisis de inyección de flujo, cuya precisión es de 1 %. En tal sentido, se demuestra que este método es una nueva y buena alternativa para realizar pruebas rápidas de forma repetitiva [16].

El estudio realizado en 2016, por Palma y otros en Chile, sugiere detectar boro con el método de azometina-H en aguas subterráneas y de lixiviados de rellenos sanitarios. Realizaron una comparación en el rango de detección de boro para el método con azometina-H y el método de espectrometría de emisión óptica de plasma acoplado inductivamente (ICP-OES) de muestras tomadas (17 de lixiviado y 56 de agua subterránea) en la región metropolitana de Chile, encontrándose que no hay diferencia en la exactitud y precisión de ambos métodos hasta concentraciones de 10 mg/L. Asimismo, el límite de cuantificación encontrado, para las muestras de lixiviado y aguas subterráneas, fue de 0.50 mg/L y 0.20 mg/L para el método con azometina-H; y de 0.124 mg/L y 0.025 mg/L para el método ICP-OES, respectivamente. El análisis de la concentración de boro por ambos métodos en las muestras de aguas subterráneas y de lixiviado, mostró rangos de 0.2 hasta 0.6 mg/L, y de 3.4 a 9.1 mg/L respectivamente; valores que están en el rango de precisión que comparten ambos métodos. Al encontrarse resultados similares, el método que utiliza azometina-H es más adecuado para un análisis rutinario por su bajo costo, sencillez y equipos de fácil manejo [17]

En Egipto, Ashfard y Ahmed, en 2019, utilizaron dispositivos de imagen digital para determinar hierro de forma económica en muestras de agua, suelo, plantas y alimentos. A partir de la reacción entre 1,10-fenantrolina y el hierro; y 2,4,6-tris (2-piridil)-s-triazina con el salicilato, con una cámara digital, un scanner y un celular capturaron imágenes de la reacción de color para luego analizar su intensidad (rojo, verde y azul). Identificaron que todos los dispositivos mostraron buena linealidad y sensibilidad; sin embargo la cámara digital de 16 MP utilizada en la estructura que ellos diseñaron, generó los mejores resultados. Los resultados fueron comparados con un espectrofotómetro encontrándose que los resultados no mostraban diferencias significativas. Esto indica que el uso de dispositivos digitales es una buena alternativa a los equipos costosos para determinar las concentraciones de diferentes elementos en una sustancia [18].

## 4. Marco teórico

### 4.1. Boro

#### a) Definición

El boro es un metaloide con un peso atómico de 10.81 que ocupa el quinto lugar en la tabla periódica, siendo el más electronegativo del Grupo III [4]; y que además, tiene propiedades similares al silicio [19]. Tiene una densidad de  $2.37 \text{ g/m}^3$ , y un punto de fusión y ebullición de  $2079 \text{ }^\circ\text{C}$  y  $2250 \text{ }^\circ\text{C}$  respectivamente [20].

#### b) Compuestos de boro

El boro (B), como elemento puro, no se encuentra en la naturaleza; pero está presente en forma de compuestos, debido a la gran afinidad que tiene con el oxígeno. Existen más de 200 compuestos de boro en la Tierra; sin embargo, de todos ellos sólo 12 son los más comercializados [4]. En la naturaleza el boro, combinado con el oxígeno, se encuentra como tetraborato de sodio, o también conocido como bórax ( $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \times 10\text{H}_2\text{O}$ ); y en menor medida se encuentra como ácido bórico [ $\text{B}(\text{OH})_3$ ]; y asociado con el flúor, como tetrafluoroborato (anión  $\text{BF}_4^-$ ) [21].

#### c) Usos

Los compuestos de boro son ampliamente utilizados en la industria para la producción de vidrios, blanqueadores, detergentes, aleaciones metálicas y cosméticos [20]; y en la agricultura principalmente se utiliza en fertilizantes químicos por ser un micronutriente importante para el desarrollo de las plantas [22].

#### d) Toxicología

Los compuestos de boro, en su mayoría, tienen una baja toxicidad para los humanos y animales; por esta razón no son considerados como un problema. Sin embargo, hay registros de intoxicación accidental con ácido bórico y algunos boratos. En las personas adultas e infantes, la ingesta de forma oral de ácido bórico en cantidades de 15 a 20 g y de 5 a 6 g respectivamente, puede ser fatal [4]. La intoxicación por boro puede ocasionar vómitos, diarrea, náuseas, anorexia y pérdida de peso [23]. En los animales, la ingesta excesiva de boro puede ocasionar efectos neurológicos adversos, pérdida de peso, malformaciones en el esqueleto y atrofia testicular [21].

#### **4.1.1. Boro en agua**

El boro está presente de diversas formas en el agua, variando de acuerdo a la concentración de éste elemento en las soluciones acuosas. A concentraciones bajas de boro ( $<0.02$  M), este se encuentra como ácido bórico y anión borato [23]; pero a concentraciones más elevadas ( $0.025 - 0.6$  M), entre un pH de 6 a 10, forma iones poliborato. En los medios acuosos, los boratos y el ácido bórico reaccionan con los alcoholes y polioles formando ésteres de boro, complejos de bis (diol) borato, ésteres neutros de monoborato de cis-diol y complejos de monoborato [4].

El boro que está presente en las aguas superficiales es consecuencia de los procesos de erosión, las características de los suelos, la proximidad a las regiones de la costa y las actividades humanas [4]. En los océanos se encuentra la mayor cantidad de boro de la Tierra, con una concentración promedio de  $4.6$  mg/L, en un rango de  $0.5$  a  $9.6$  mg/L, cuyo valor máximo se encuentra en el mar Mediterráneo. En aguas subterráneas, el boro naturalmente tiene una concentración de no más de  $1$  mg/L; sin embargo puede incrementarse como resultado de la contaminación humana, áreas con actividad geotérmica, entre otros [21].

#### **4.1.2. Boro en suelo**

El boro se encuentra en los suelos como ácido bórico y en menor medida como tetrahidroxiborato, además, es considerado como el elemento más móvil en los suelos [21]. Los compuestos de boro se mueven siguiendo el flujo de agua, que proviene de la irrigación agrícola y las precipitaciones [4]; por ello en zonas húmedas el boro es lixiviado del suelo fácilmente, mientras que en zonas áridas, puede acumularse en las capas superficiales alcanzando niveles tóxicos [24]. Los suelos arenosos, con textura ligera, tienen una menor cantidad de boro asimilable por las plantas que los suelos arcillosos. Por otro lado, los suelos que tiene un alto contenido de materia orgánica, presentan deficiencia de boro, como consecuencia de la alta afinidad que tiene este elemento con la materia orgánica [4].

#### **4.1.3. Boro en plantas**

##### **a) Funciones del boro en las plantas**

El boro cumple diferentes funciones en las plantas como: metabolismo de azúcares y almidones, crecimiento de la raíz, metabolismo del ácido nucleico, formación de la flor, metabolismo de proteínas, aminoácidos y nitratos; producción de la semilla; y metabolismo de auxina y fenol [22]; sin embargo, la más importante de todas es el rol que cumple en la estabilidad de la membrana

celular, porque el 90 % del boro en la planta se encuentra en ésta membrana [21].

#### **b) Toxicidad de boro en las plantas**

La toxicidad de boro afecta la calidad de los cultivos [24]. Los síntomas por toxicidad de boro varían en relación al tipo de cultivo, pero los más comunes son la coloración y necrosis de las hojas, comenzando por los bordes y luego extendiéndose al resto de éstas [25]; reducción del grosor de la planta, retraso en el desarrollo de la raíz, disminución en el número, tamaño y peso de las frutas; y alteración del proceso de fotosíntesis [21].

### **4.2. Métodos analíticos para determinar boro en agua**

#### **4.2.1. Métodos espectrofotométricos**

Los métodos espectrofotométricos se basan en la medición de la absorción de radiación en regiones ultravioleta visibles y cercanas, gracias a la formación de compuestos de color a partir de la reacción entre un agente reactivo y el analito [19].

Bajo esta idea para analizar boro, el método espectrofotométrico se basa en la reacción colorimétrica del boro, presente en la muestra, con reactivos como la curcumina, el carmín y la azometina-H [26]. El boro presente en la muestra está relacionado con la densidad óptica [4].

Cuando se utiliza como reactivo la curcumina ( $C_{21}H_{20}O_6$ ) en una solución ácida, se forma un complejo de color rojizo llamado rosocianina [ $B(C_{21}H_{19}O_6)_2Cl$ ] al entrar en contacto con el boro presente en el agua [4], alcanzando la máxima adsorción a una longitud de onda de 550 nm [19].

Por otro lado, cuando se utiliza como reactivo el carmín y ácido sulfúrico concentrado, se forma un complejo azulado al entrar en contacto con el boro [4], alcanzado la máxima adsorción a una longitud de onda de 615 nm [19].

El método que emplea azometina-H, y que no necesita ácidos concentrados, forma un complejo de color amarillo de forma rápida (alrededor de 15 minutos) cuando la reacción se da a un pH de 6. La longitud de onda adecuada (a un pH ácido) para poder analizar la concentración de boro en la solución es de 410 nm. Como lo muestra la Tabla 1, éste método es el más sensible de todos [4].

Tabla 1  
Métodos espectrofotométricos para determinar boro en agua

Reactivo	Color de la reacción	Concentración de boro recomendada	Medio ácido	Máxima adsorción
Curcumina	Rojizo	0.1 - 1.0 mg/L	Sí	550 nm
Carmín	Azulado	1.0 - 10 mg/L	Sí	615 nm
Azometina-H	Amarillo	0.01 - 1 mg/L	No	410 nm

Fuente: [4] [19]

#### 4.2.2. Método espectroscópico de absorción atómica

El método espectroscópico de absorción atómica (AAS) consiste en introducir las muestras a una flama, que por lo general es originada a partir de acetileno y aire, o de acetileno y nitrógeno (N<sub>2</sub>); en dónde los elementos de la muestra son atomizados [27]. El AAS, permite identificar un gran número de elementos; sin embargo, en el caso del boro, éste método no tiene mucha sensibilidad; y para que los resultados sean aceptables, el boro contenido en la muestra debe ser separado y preconcentrado [4].

#### 4.2.3. Métodos de ICP plasma

El método de plasma inductivo acoplado (ICP) es el más utilizado para analizar boro entre todas las técnicas basadas en plasma [28]. Su funcionamiento se basa en el uso de corriente eléctrica para formar una fuente de plasma. Las soluciones que se analizan por éste método son introducidas utilizando un nebulizador, para luego ser pulverizadas y finalmente entrar en contacto con el plasma [4]. A pesar de ser mucho más sensibles que los métodos espectrofotométricos y AAS, su límite de cuantificación es menor [29].

### 4.3. Sensores colorimétricos

#### 4.3.1. Definición

Son sensores ópticos que transforman un estímulo en una señal que puede ser analizada. Las interacciones entre el medio y el sensor, permiten un cambio en las propiedades ópticas; es decir, un cambio de color, que puede ser identificado a simple vista para luego ser interpretado [30].

#### 4.3.2. Quimiosensores colorimétricos

Son un tipo de sensores ópticos que muestran un cambio de color en el analito como consecuencia de una reacción química [30]. La concentración de un elemento específico, contenido en la muestra, se cuantifica de acuerdo con los cambios visuales de color [31].

Una de las propiedades deseadas que deben tener estos sensores, y que los diferencian del resto, es su selectividad y reversibilidad; es por eso que las reacciones químicas deben ser selectivas pero reversibles [30]. El diseño de este tipo de sensor, puede ser por unión directa o por una unión competitiva. El sistema formado por un receptor y un transductor (RSR), es un ejemplo de la unión directa; donde el transductor transforma y amplifica los estímulos que alteran las propiedades del receptor, convirtiéndolos en señales observables [32]. Por otro lado, el sensor que emplea el sistema de desplazamiento de un indicador (IDA), utiliza la competencia entre el analito y el indicador, que resulta en una señal visible como consecuencia del desplazamiento del indicador [33]. La capacidad de identificar un elemento en particular (selectividad), se puede mejorar con estímulos externos como la variación de la temperatura, cambio en el pH de la solución, o el aumento y disminución de la presión [30].

Los quimiosensores colorimétricos se caracterizan por un cambio de color (cambio óptico en el rango visible de 400 - 800 nm), que generalmente se puede apreciar a simple vista. Estos son diseñados para realizar un análisis no destructivo y sin instrumentos, que pueden ser realizados por personas con poca preparación. Cabe resaltar que estos sensores permiten un análisis no sólo cualitativo; sino también cuantitativo, esto se logra comparando el color del sensor con las escalas de color apropiadas, que se vienen empleando hace más de un siglo, para saber la concentración del elemento analizado en la muestra [30]. Por ejemplo, en la Figura 1, se muestra la escala de color utilizada para cuantificar iones de hierro ( $\text{Fe}^{2+}$ ) en una solución acuosa, donde la cantidad de  $\text{Fe}^{2+}$  se ve reflejada en la intensidad del color, lo que permite una cuantificación visual y rápida de los iones presentes en la muestra a diferentes volúmenes [34].

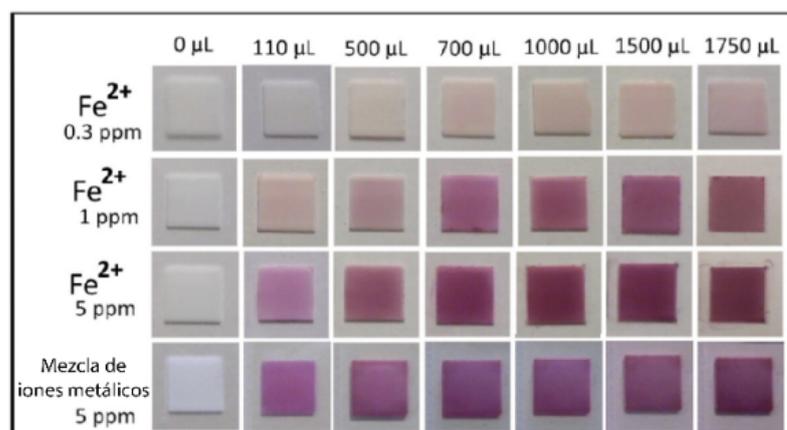


Figura 1. Escala de color que muestra la concentración de  $\text{Fe}^{2+}$  en volúmenes variables de soluciones acuosas

Fuente: [34]

#### **4.4. Kit colorimétrico**

##### **4.4.1. Definición**

Son un conjunto de elementos (reactivos y materiales) que permiten realizar un análisis basado en una reacción colorimétrica identificable a simple vista. Son de uso rápido y no requieren de personas con experiencia en química [35].

##### **4.4.2. Aplicaciones**

Su mayor campo de aplicación está en la determinación de la concentración de elementos o impurezas en agua potable, agua subterránea, agua superficial, entre otros, y en aquellos procesos que emplean agua en donde se tiene que realizar un monitoreo constante de diferentes parámetros como alcalinidad, dureza total, pH, cantidad de hierro, oxígeno, amonio, fosfatos, entre otros [36].

##### **4.4.3. Elementos**

La mayoría contiene recipientes cerrados independientes en donde se encuentran los reactivos que se utilizan de acuerdo al análisis para el cual está destinado el kit; además tienen recipientes transparentes en los cuales se realizan las mezclas necesarias para obtener el complejo de color y compararlo con la escala de color del kit. La escala de color puede ser de diferentes tipos: tarjeta colorimétrica, disco de comparación, comparador deslizable, entre otros [36].



Figura 2. (A) Kit con disco comparador, (B) kit con tarjeta colorimétrica y (C) kit con comparador deslizable  
Fuente: [36]

#### **4.5. Costos de producción, gastos y determinación de precios**

##### **4.5.1. Definición de costos**

Es todo aquel recurso utilizado, expresado en un valor monetario, para poder adquirir un determinado producto o servicio [37].

#### **4.5.2. Costos de producción**

Tal como su nombre lo indica, se derivan de los procesos de transformación de la materia prima; es decir, todo aquel recurso utilizado para fabricar los productos finales. El costo de producción se encuentra formado por los costos de mano de obra directa (MOD), materia prima directa (MPD) y los costos indirectos de fabricación (CIF) [38].

##### **a) Mano de obra directa**

Son los materiales que se transforman en los productos finales, y que están directamente relacionados con estos, permitiendo su cuantificación [37].

##### **b) Materia prima directa**

Son los sueldos de las personas que ayudan en la transformación de los materiales en productos finales, y que están directamente relacionados con estos, permitiendo su cuantificación [38].

##### **c) Costos indirectos de fabricación (insumos)**

A diferencia de los anteriores, estos no pueden ser cuantificados fácilmente, pero si están involucrados en la transformación de la materia prima [37].

#### **4.5.3. Gastos**

Los gastos son los recursos monetarios que utiliza una empresa para fabricar un producto o brindar un determinado servicio que no está directamente relacionado al proceso de producción [39].

#### **4.5.4. Determinación de precios**

Para la determinación del precio de venta de un producto es necesario poder identificar en primer lugar los costos de producción (CP) y los gastos (GG); siendo el primero la suma del costo de materia prima directa, la mano de obra directa y los costos indirectos de fabricación; y el segundo es la suma de los costos de ventas (GV), administrativos (GA), y financieros (GF) si los hubiera. Utilizando el costo total de producción y los gastos generales se calcula el costo total (CT), para luego hallar el costo unitario (CU), dividiendo el costo total entre las unidades producidas (Q). Como alternativa se puede calcular los costos y gastos por unidad producida para hallar el costo unitario [40].

$$CP = MOD + MPD + CIF \quad (1)$$

$$CT = CP + GV + GA + GF \quad (2)$$

$$CU = \frac{CT}{Q} \quad (3)$$

El precio de venta (PV) de un producto está determinado por la utilidad que la empresa espera ganar y que se expresa en un porcentaje. La empresa puede definir su porcentaje de utilidad en función a la cantidad monetaria que espera ganar tomando como referencia los precios de productos similares que existen en el mercado [39].

$$PV = CU + Utilidad \quad (4)$$

## **5. Metodología de la investigación**

### **5.1. Tipo de investigación**

El presente trabajo de investigación es cuantitativo y experimental porque además de diseñar el prototipo de un kit colorimétrico, se determinará la concentración de boro en agua realizando pruebas experimentales con una escala de color basada en el método espectrofotométrico de la azometina-H.

### **5.2. Nivel de investigación**

El nivel de la investigación es descriptivo y correlacional porque se describirá el diseño del kit colorimétrico para que permita determinar la concentración de boro en agua de acuerdo a una intensidad de color específica.

### **5.3. Variables**

#### **a) Variable independiente**

Diseño de kit colorimétrico: Conjunto de elementos que generan una reacción colorimétrica observable a simple vista en una solución [30].

#### **b) Variable dependiente**

Concentración de boro: Cantidad en mg/L o ppm de boro que está presente en una muestra [41].

### **5.4. Instrumentos de investigación**

#### **a) Equipos e instrumentos**

- Espectrofotómetro UV-VIS Genesys 150 – Thermo Scientific
- Cámara Panasonic Lumix FZ2000
- Difusor Godox MS200
- Potenciómetro HANNA HI2210-01
- Balanza analítica digital

#### **b) Reactivos**

- Acetato de amonio
- Sal disódica del ácido etilendinitrilotetraacético (EDTA-Na<sub>2</sub>)
- Ácido bórico (H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>)
- Ácido acético glacial
- Azometina-H (C<sub>17</sub>H<sub>12</sub>NNaO<sub>8</sub>S<sub>2</sub>)
- Ácido ascórbico (C<sub>6</sub>H<sub>8</sub>O<sub>6</sub>)

**c) Materiales**

- Material de vidrio para laboratorio
- Envases de plástico

**5.5. Procedimiento de recolección de datos**

**a) Fabricación de la estructura para tomar fotografías del complejo coloreado**

Se elaboró una estructura con dos paredes laterales soportadas en una base [18], con las siguientes dimensiones: 40 x 30 x 30 cm como se observa en la Figura 3 y 4. Para la cara lateral (A), se utilizó como material un tablero de baja densidad, conocido como *trupan*, con un espesor de 3 mm, que fue cortado en forma rectangular de 40 x 30 cm y pintado con pintura en aerosol de color blanco mate.

La cara posterior (B) que está detrás de la celda de cuarzo (G), se elaboró a partir de una plancha de *trupan* de 3 mm de espesor con forma cuadrada de 30 cm de lado que fue cortada con láser para obtener la forma que se muestra en la Figura 3. Se pegó un pliego de papel retroiluminado, también conocido como *backlight*, de forma cuadrada de 30 cm de lado sobre la cara posterior utilizando cola sintética, lo que permitió generar un fondo de color blanco cuando se alumbró con un flash Godox MS200, logrando resaltar el color del complejo coloreado en la celda de cuarzo de 12.5 x 12.5 x 45 mm y con un paso de luz de 10 mm.

La base de la estructura (C), se elaboró de *trupan* de 3 mm de espesor cortado en forma rectangular de 40 x 30 cm. Se colocaron guías de 1 x 12 cm (D) y de 1 x 17.5 cm (E) hechas de *trupan* del mismo espesor (3 mm). Estas guías permitieron ubicar de forma fija la base de la cámara y la base de la celda de cuarzo, estando ambas alineadas a un mismo eje.

La base de la cámara (F) se elaboró de *trupan* de 6 mm de espesor y se colocó guías del mismo material para mantener la cámara fija al momento de tomar las fotografías como se muestra en la Figura 3.

La celda de cuarzo (G) se ubicó de manera equidistante al lente de la cámara (5 cm) y a la cara posterior (5 cm) [18], siendo colocada sobre una base de *trupan* de 10 x 1.2 x 4 cm (H), pintada con pintura en aerosol blanco mate.

Se colocó soportes laterales en la base de la celda de cuarzo, estos se ubicaron en las caras opacas de la celda para mantenerla fija al momento de tomar las fotografías, además permitió colocar la celda en el mismo lugar cada vez que se cambiaba el complejo de color.

Todos los materiales utilizados para la elaboración de la estructura fueron adquiridos en tiendas locales de la ciudad de Arequipa.

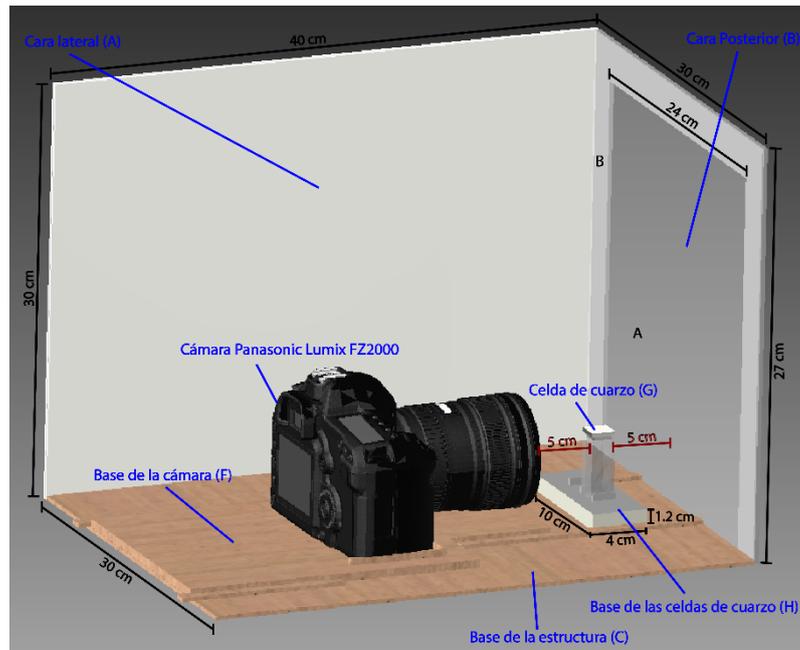


Figura 3. Estructura para tomar fotografías (diseño 3D)  
Fuente: Elaboración propia

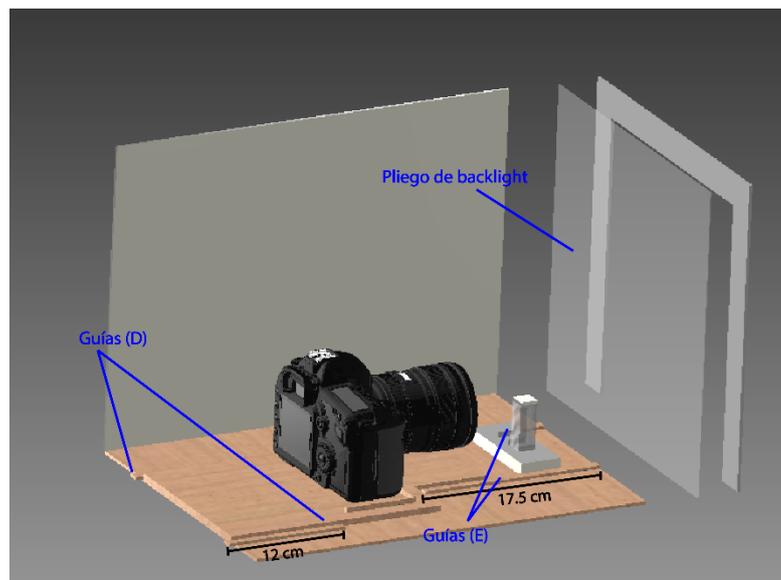


Figura 4. Estructura para tomar fotografías mostrando el papel retroiluminado (diseño 3D).  
Fuente: Elaboración propia

## b) Diseño e impresión de la escala colorimétrica para determinar boro

### Preparación de soluciones

La metodología empleada para preparar las soluciones se detalla en la Figura 5 [42].

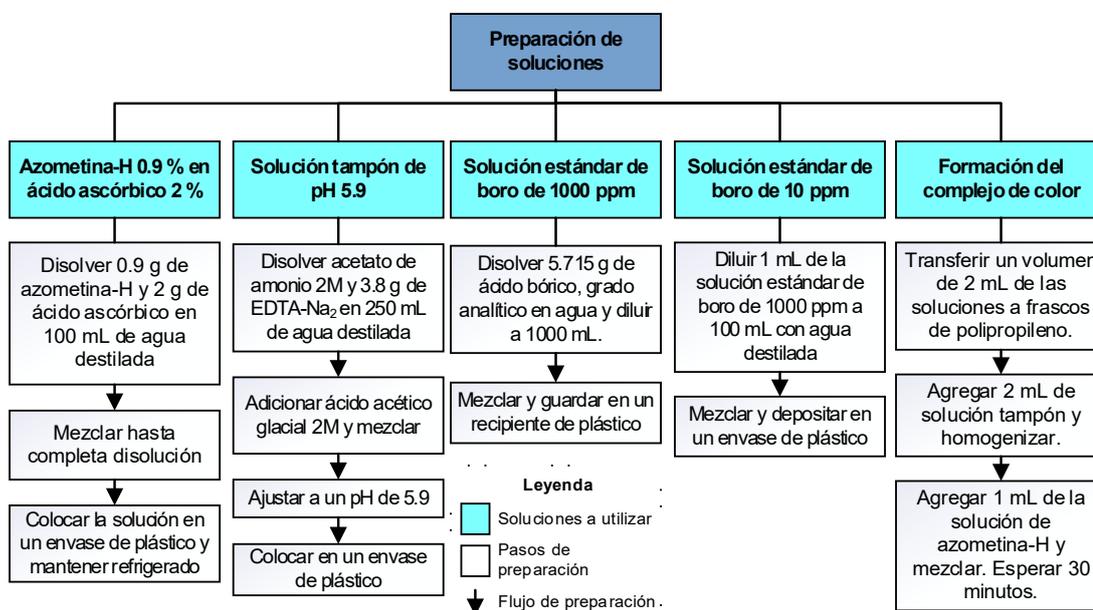


Figura 5. Metodología para la preparación de soluciones  
Fuente: Elaboración propia

Para la escala de color y la elaboración de la curva de calibración se preparó un complejo de color con concentraciones de 0.5, 1, 2, 4, 6 y 8 mg/L de boro.

### Determinación de boro con el método espectrofotométrico

Se realizó la medición por duplicado de la absorbancia para las muestras a 420 nm de longitud de onda [43], con el espectrofotómetro UV-VIS Genesys 150 - Thermo Scientific. Los resultados se registraron para su posterior análisis.

### Toma de fotografías del complejo coloreado

Las fotos se tomaron en un ambiente cerrado con iluminación fluorescente. Se empleó un flash Godox MS200 acoplado a un difusor Godox de 120 cm de diámetro para iluminar el pliego de *backlight* de la cara posterior de la estructura previamente elaborada y se ubicó a 29 cm de distancia como se observa en la Figura 6.

Se realizaron pruebas con la cámara Panasonic Lumix FZ2000 con la finalidad de identificar los parámetros adecuados para tomar las fotografías del complejo

de color. Estos parámetros fueron el modo de la cámara, la velocidad de disparo, el balance de blancos, el diafragma, el zoom y el ISO.

Con esos parámetros definidos, se tomaron 5 fotos por cada nivel de concentración de boro del complejo de color contenido en la celda de cuarzo.

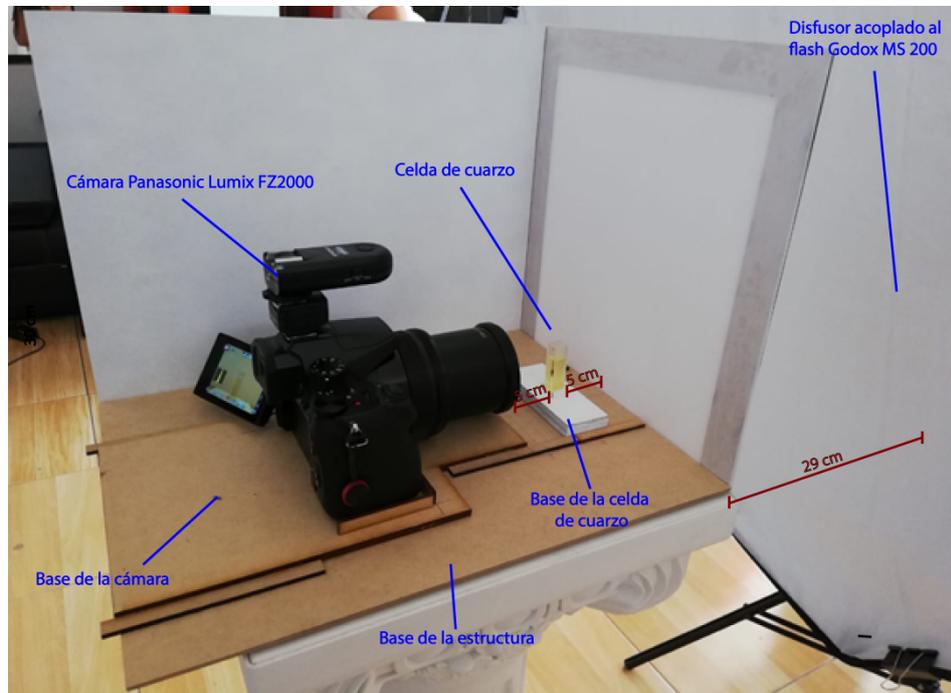


Figura 6. Estructura para tomar fotografías  
Fuente: Elaboración propia

### Diseño e impresión de la escala de color

Todas las fotografías tomadas, 35 en total, fueron descargadas con una resolución de 5472 x 3648 y en formato RAW/JPEG a una computadora personal, en dónde se escogió una foto por cada nivel de concentración (7 fotos), teniendo como criterio de selección la calidad visual de la fotografía.

Se utilizó el software Adobe Photoshop Lightroom para procesar las fotos y ajustar el balance de blancos, con la finalidad de obtener un color más real al momento de realizar la impresión de las fotos. En todo momento el formato de color de las fotos se mantuvo en sRGB.

Utilizando el software Adobe Photoshop se recortó una parte de las fotografías seleccionadas en donde se visualizaba el color del complejo de azometina-H y boro. El recorte se realizó en forma rectangular. Las secciones de las imágenes recortadas se colocaron una al lado de otra dejando un espacio en blanco, formando así la escala colorimétrica, del menos intenso (0 mg/L) al de mayor

intensidad (8 mg/L), indicando en la parte superior de cada recorte la concentración de boro en mg/L que ocasionaba esa intensidad de color.

Adicionalmente se elaboró una escala de color mostrando las celdas de cuarzo, con el objetivo de ver si había una diferencia significativa en el color con la escala elaborada anteriormente (recortes rectangulares).

Se realizó una comparación visual entre las 2 escalas de color, identificando cual de ellas tenía una mejor calidad visual y mantenía el color original del complejo de azometina-H y boro. Ésta comparación se realizó con el objetivo de tener una escala que no genere un falso positivo cuando se emplee para determinar la concentración boro en muestras de agua.

Luego de realizar pruebas empleando impresión química, impresión con inyección de tinta e impresión láser para determinar cuál de ellas tenía mejores resultados, se decidió realizar la impresión láser de la escala de color en una imprenta local de la ciudad de Arequipa, empleando papel *couché* de alto gramaje (250 g) en tamaño A4.

#### **Determinación de boro con la escala de color**

Utilizando una muestra de agua contaminada con boro, se determinó la concentración de este elemento con la escala colorimétrica.

#### **c) Diseño del prototipo del kit colorimétrico**

El kit colorimétrico constará de un maletín negro de polipropileno, este material es comúnmente utilizado en la fabricación de maletines de herramientas. Su interior tendrá dos secciones, una destinada a las soluciones que permitirán generar el complejo de color y otra para los materiales.

La zona destinada para las soluciones estará conformada por una caja térmica de tecnopor con su tapa, que tendrá espacio suficiente para albergar un icepack de 7.62 x 7.62 cm. Ésta caja será desmontable, lo que permitirá guardarla en un refrigerador hasta que se requiera el uso del kit.

La zona destinada para los materiales del kit tendrá una esponja de color negro con espacios de tamaño específico para mantener fijos los diferentes componentes del kit, evitando que se muevan o dañen al momento de trasladar el kit colorimétrico.

Los materiales que tendrá el kit son los siguientes:

- Tres cuentagotas de vidrio de 1 mL graduado, para poder trasladar la solución tampón de pH 5.9, la solución de azometina-H y la muestra de agua de sus respectivos envases y mezclarlos en otro recipiente.
- Un tubo de ensayo de plástico de 15 mL, para realizar la mezcla y formación del complejo de color.
- Dos vasos de precipitado de 50 mL, para tomar las muestras de agua y realizar la precipitación y el filtrado en caso sea necesario.
- Un embudo de 50 mm de diámetro y papel filtro GE Whatman - grado 1 de 110 mm de diámetro, para poder realizar el filtrado de las muestras de agua.
- Tubo de ensayo de vidrio de 6 mL sin graduación, para colocar el complejo de color.
- Escala de color en forma de abanico, para poder identificar la concentración de boro de la solución.

Las soluciones que tendrá el kit son:

- Solución de azometina-H 0.9 % y ácido ascórbico 2 %
- Solución tampón pH 5.9

Debido a que la solución de azometina-H con ácido ascórbico tiene una vida útil de 15 días [44], se ha considerado que inicialmente el kit permitirá realizar 10 ensayos, con la posibilidad de adquirir de manera independiente la solución de azometina-H y la solución tampón para realizar ensayos adicionales en caso sea necesario.

Considerando la cantidad de ensayos mencionada anteriormente, el kit tendrá 3 envases de plástico de 10 mL cada uno. Dos envases de la solución tampón y uno de la solución de azometina-H con ácido ascórbico.

Con lo detallado en párrafos anteriores, se utilizó el software Autodesk Inventor Professional 2015 para realizar el diseño del kit colorimétrico en 3D.

#### **d) Evaluación económica del prototipo del kit colorimétrico**

Utilizando el software Microsoft Excel se realizó un listado de los costos de los componentes del kit colorimétrico mencionados anteriormente elaborando una tabla con los encabezados de descripción, cantidad, precio unitario y total.

Los costos se clasificaron en tres grupos: soluciones, estructura del kit colorimétrico y materiales. Para el presente estudio no se consideró costos de mano de obra ni gastos secundarios como energía eléctrica, agua, entre otros [45].

Se consultó en tiendas locales de la ciudad y tiendas en internet los precios de los componentes del kit colorimétrico.

Finalmente se calculó la cantidad de kits colorimétricos que deben venderse para cubrir los costos incurridos en su elaboración considerando las cantidades de reactivos que ofrecen los proveedores.

## 5.6. Técnicas de procesamiento y análisis de datos

Los resultados obtenidos con el método espectrofotométrico fueron procesados y analizados en Microsoft Excel. Utilizando las fórmulas 5, 6 y 7; se calculó el promedio, la desviación estándar y el coeficiente de variación, respectivamente [43].

$$\bar{X} = \frac{\sum x}{n} \quad (5)$$

*Donde:*

$\bar{X}$  = Promedio

$n$  = Tamaño del conjunto de datos

$\sum x$  = Sumatoria

$$S = \sqrt{\frac{\sum x^2 - \frac{(\sum x)^2}{n}}{n-1}} \quad (6)$$

*Donde:*

$S$  = Desviación estándar

$n$  = Tamaño del conjunto de datos

$\sum x$  = Sumatoria

$$CV(\%) = \frac{S}{\bar{X}} \times 100 \quad (7)$$

*Donde:*

$S$  = Desviación estándar

$\bar{X}$  = Promedio

$CV(\%)$  = Coeficiente de variación

Se construyó la curva de calibración considerando en el eje X las concentraciones de boro y en el eje Y las absorbancias promedio [46]. Esto permitió determinar el rango lineal del método en función a la ecuación de la recta de la curva de calibración y el coeficiente de determinación [17]. El análisis de la linealidad fue

necesario para determinar la proporcionalidad entre la concentración y su respuesta [46].

$$y = a + bx \quad (8)$$

*Donde:*

*x = Concentración de boro*

*y = Absorbancia*

*b = valor de la pendiente*

*a = Término independiente*

Para comprobar la correlación entre la absorbancia y la concentración se aplicó la prueba t [47]. Se halló el  $t_{\text{calculado}}$  y se comparó con el  $t_{\text{teórico}}$ , éste último se obtuvo de tablas para  $n - 2$  grados de libertad y 95 % de confianza.

$$t_{\text{calculado}} = \frac{|r|\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}} \quad (9)$$

*Donde:*

*$r^2$  = coeficiente de correlación*

*n = número de muestras*

Finalmente calculó el límite de detección (LOD) y el límite de cuantificación (LOQ) con el objetivo de saber cuál es la concentración mínima que es detectada y la mínima concentración que es cuantificada de manera confiable por el método utilizado [47], respectivamente. Se utilizaron las *fórmulas 10 y 11* para tal fin.

$$LOD = \frac{Y_{\text{blanco}} + (3 \times S_{\text{blanco}})}{b \times \sqrt{n}} \quad (10)$$

$$LOQ = \frac{Y_{\text{blanco}} + (10 \times S_{\text{blanco}})}{b \times \sqrt{n}} \quad (11)$$

*Donde:*

*$Y_{\text{blanco}}$  = Y cuando X es cero*

*$S_{\text{blanco}}$  = desviación estándar*

*b = pendiente de la recta*

*n = número de muestras*

## 6. Resultados y discusión

### 6.1. Pruebas preliminares

En el presente estudio se hicieron diferentes pruebas de fotografía utilizando una solución de agua con una bebida carbonatada de color amarillo, adquirida en una tienda local, que fue desgasificada antes de elaborar las soluciones para evitar la presencia de burbujas en las fotografías. Se prepararon 4 soluciones con 3, 1.5, 0.8 y 0.4 mL de la bebida carbonatada en cuatro tubos de ensayo de 10 mm de diámetro y 75 mm de alto, añadiendo agua hasta alcanzar un volumen final de 3 mL.

Las pruebas se realizaron utilizando luz natural y luz artificial empleando la estructura propuesta por Mohamed y Shalaby [18], que estaba formada por dos caras sólidas que no permitían el paso de la luz soportadas en una base, como se observa en la Figura 7A. Luego de no observar buenos resultados en las fotografías (Figura 8A), se decidió modificar la cara posterior de 30 x 30 cm utilizando papel retroiluminado.

Con la nueva estructura (Figura 7B) y empleando un flash Godox MS200, se obtuvieron mejores fotografías (Figura 8B).

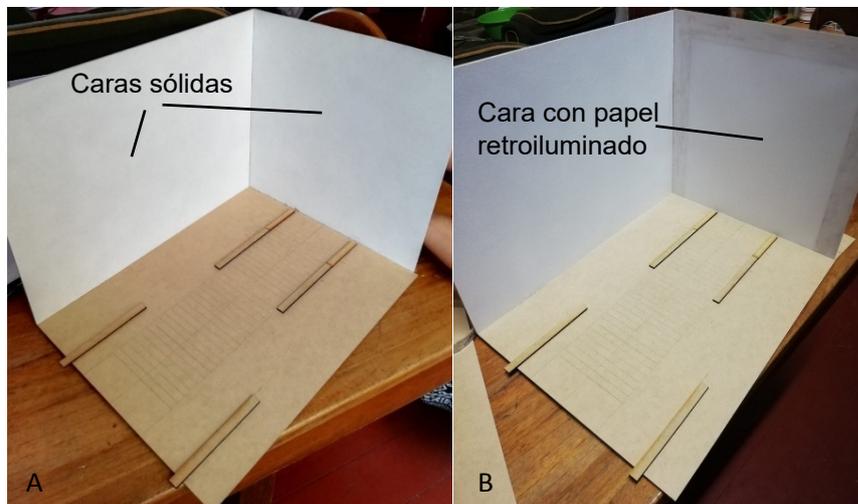


Figura 7. Estructura inicial (A) y estructura final (B)  
Fuente: Elaboración propia

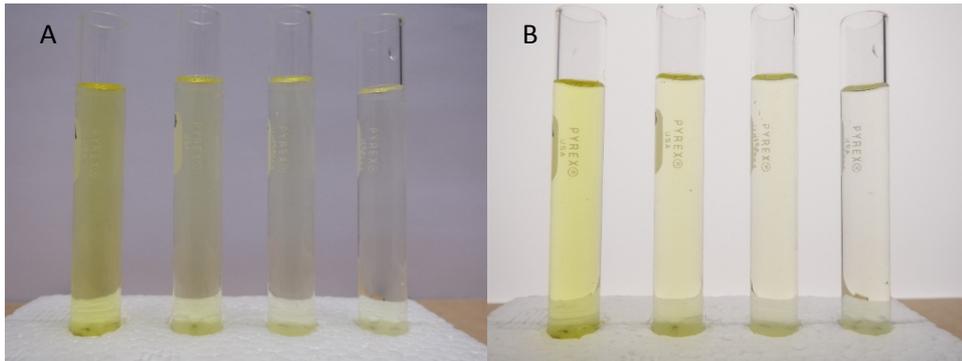


Figura 8. Fotografía utilizando iluminación artificial en la estructura inicial (A) y fotografía utilizando iluminación posterior en la estructura final (B)

Fuente: Elaboración propia

El contenido de cada tubo de ensayo (solución de la bebida carbonatada) se trasladó a una celda de cuarzo para realizar pruebas con la cámara Panasonic Lumix FZ2000 y tomar nuevas fotografías, como se muestra en la Figura 9.

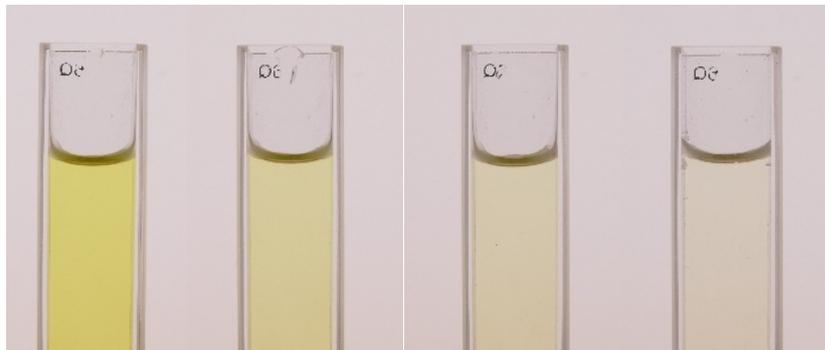


Figura 9. Fotografías de las celdas de cuarzo con la solución de la bebida carbonatada

Fuente: Elaboración propia

Luego de realizar pruebas fotográficas en la nueva estructura (apartado de metodología, ver Figura 3), se determinó que la cámara Panasonic Lumix FZ2000 debe tener la siguiente configuración: modo manual, con ISO 200, velocidad de disparo 1/160, diafragma 9.0, balance de blancos en la opción flash, ajustando el zoom del lente macro (24 - 480 mm) a 37 mm. El flash Godox MS200 debe estar a una potencia de 1/8, respetando una distancia de 29 cm desde la cara posterior.

## 6.2. Curva de calibración

Como se menciona en la parte metodológica, se elaboró la curva de calibración de 0.5 a 8 mg/L realizando la medición por duplicado a 420 nm de longitud de onda de la absorbancia del complejo de color azometina-H y boro utilizando el espectrofotómetro UV-VIS Genesys 150 Thermo Scientific.

Con los datos obtenidos, se calculó el promedio de ambas absorbancias, la desviación estándar y el coeficiente de variación, como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2  
*Absorbancia promedio, desviación estándar y coeficiente de variación*

<b>Estándar</b>	<b>Concentración (mg/L)</b>	<b>Absorbancia 1</b>	<b>Absorbancia 2</b>	<b>Absorbancia Promedio</b>	<b>Desviación Estándar</b>	<b>Coficiente de variación</b>
<b>Std 1</b>	0.500	0.072	0.069	0.071	0.0021	3.009%
<b>Std 2</b>	1.000	0.153	0.154	0.154	0.0007	0.461%
<b>Std 3</b>	2.000	0.356	0.371	0.364	0.0106	2.918%
<b>Std 4</b>	4.000	0.773	0.810	0.792	0.0262	3.305%
<b>Std 5</b>	6.000	1.195	1.258	1.227	0.0445	3.632%
<b>Std 6</b>	8.000	1.603	1.654	1.629	0.0361	2.214%

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 10, se muestra la curva de calibración elaborada para las concentraciones mostradas en la Tabla 2. Se utilizó la absorbancia promedio por cada nivel de concentración y se obtuvo la ecuación de la recta  $y = 0.2103x - 0.0479$ , con un coeficiente de correlación de 0.9997 y un rango lineal de absorbancia entre  $0.071 \pm 0.0021$  y  $1.629 \pm 0.0361$ .

Se aplicó la prueba t encontrándose los valores de 115.45 y 2.77, para el valor de t calculado y teórico, respectivamente; demostrando que existe una buena correlación entre la concentración y la absorbancia del método empleado.

El coeficiente de correlación calculado, tiene un valor cercano al encontrado por Mohammed [48] y Portocarrero [42] que fue de 0.9998, y además es mayor al hallado por Romero [46] que fue de 0.9996, pudiendo destacarse que los autores previamente mencionados utilizaron valores inferiores a 5 mg/L para elaborar la curva de calibración.

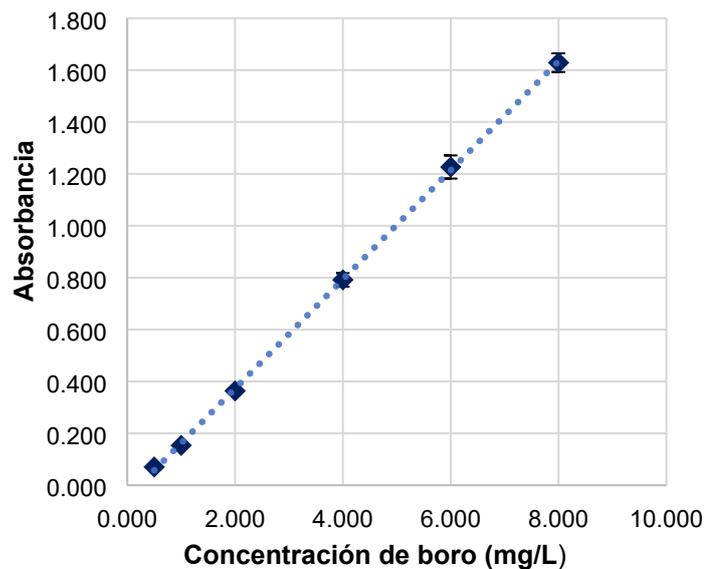


Figura 10. Curva de calibración  
Fuente: Elaboración propia

Utilizando la concentración de boro y la desviación estándar se elaboró el gráfico mostrado en la Figura 11, hallando la ecuación de la recta  $y = 0.0057x - 0.0004$ , para posteriormente calcular el límite de detección y cuantificación con la desviación estándar del blanco ( $S_{\text{blanco}}$ ).

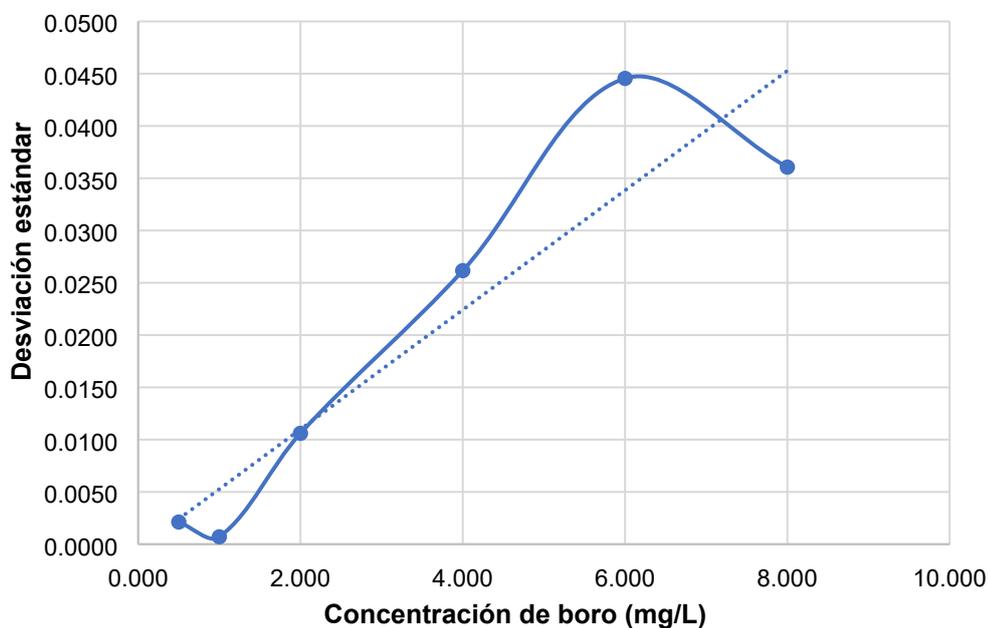


Figura 11. Concentración de boro vs desviación estándar  
Fuente: Elaboración propia

El límite de detección (LOD) calculado fue 0.0953 mg/L y el límite de cuantificación (LOQ) fue 0.1008 mg/L. Estos valores se calcularon utilizando la información que se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3  
Valores para calcular el límite de detección y cuantificación

Determinación de LOD y LOQ		
Cuando x es cero	$Y_{\text{blanco}}$	0.0479
Desviación estándar del resultado cuando x es cero	$S_{\text{blanco}}$	0.0004
Número de muestras	n	6
Pendiente	b	0.2103

Fuente: Elaboración propia

### 6.3. Elaboración de la escala de color

Se tomó las fotografías del complejo de color con concentraciones de boro de 0 a 8 mg/L. Como se detalla en la parte metodológica, del total de 35 fotografías, se seleccionaron 7 (una por cada nivel de concentración). Se utilizó el software Adobe Photoshop Lightroom para procesar las fotos y ajustar el balance de blancos. Luego, con el software Adobe Photoshop se recortó parte de la imagen en forma rectangular para formar la escala de color que se muestra en la Figura 12. Adicionalmente se elaboró una escala con recortes que muestran toda la celda de cuarzo con el complejo coloreado en su interior, como se observa en la Figura 13.



Figura 12. Escala de color con recortes en forma rectangular  
Fuente: Elaboración propia



Figura 13. Escala de color con recortes en forma rectangular mostrando la celda de cuarzo  
Fuente: Elaboración propia

Luego se comparó las escalas previamente mostradas, pudiendo identificarse que en la escala de la Figura 13 los colores tenían una mayor similitud al complejo de color de la azometina-H y el boro.

Para corroborar si la escala colorimétrica funciona de una manera adecuada, se contaminó una muestra de agua con una cantidad conocida de boro. Se siguió el procedimiento para la formación del complejo de color, mezclando 2 mL de la muestra de agua, 2 mL de la solución tampón y 1 mL de la solución de azometina-H, obteniendo un resultado de 4 mg/L como se observa en la Figura 14.

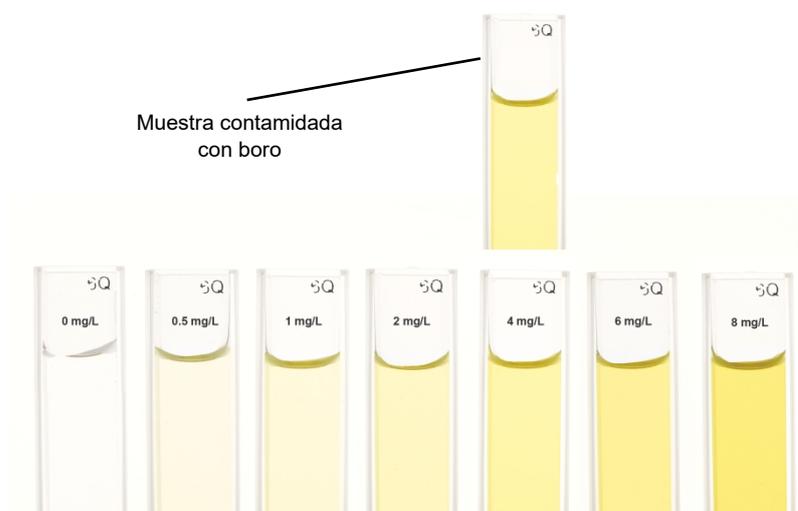


Figura 14. Muestra de agua contaminada con boro comparada con el resto de concentraciones

Fuente: Elaboración propia

Con la finalidad de que la escala de color sea de fácil uso y ocupe el menor espacio posible, se tomó la decisión de colocar los colores en forma de abanico, como se muestra en la Figura 15.

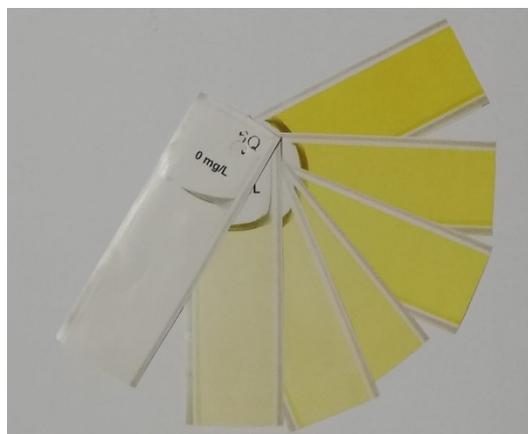


Figura 15. Escala de color en forma de abanico

Fuente: Elaboración propia

#### 6.4. Diseño del kit colorimétrico

En la Figura 16, se observa el diseño en 3D del kit colorimétrico propuesto, en donde se señalan los componentes descritos en la parte metodológica.

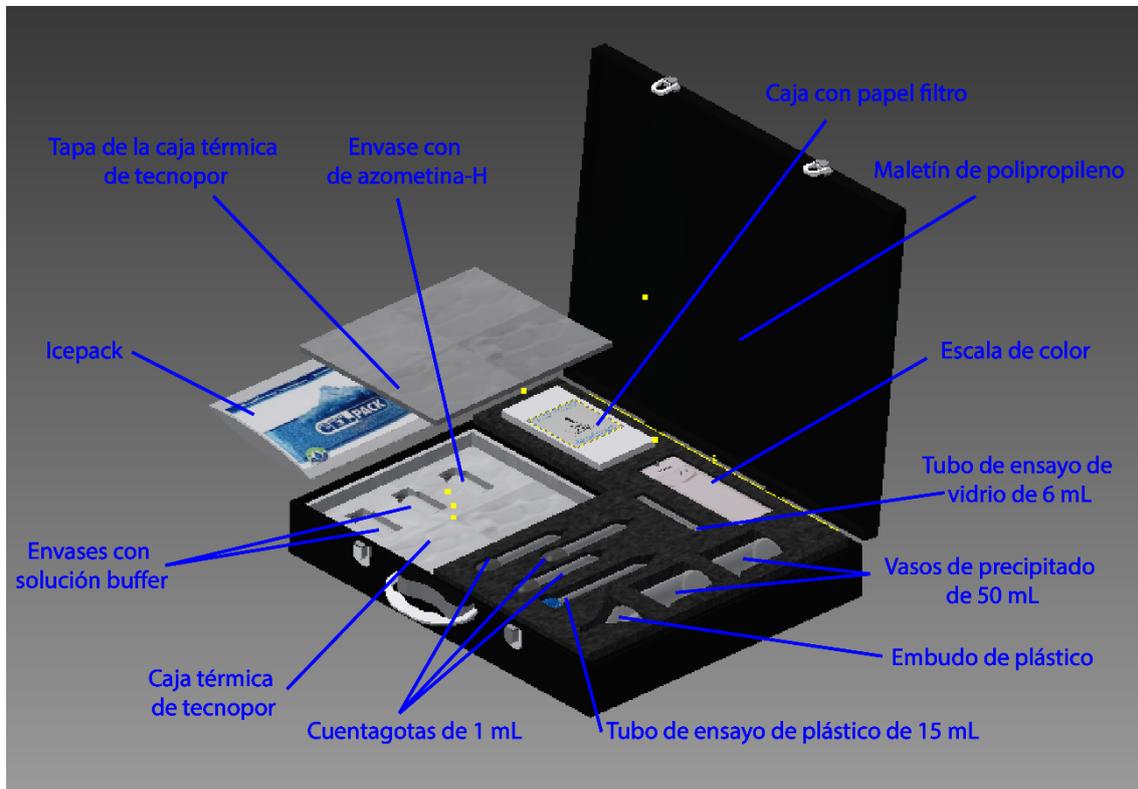


Figura 16. Diseño en 3D del prototipo de kit colorimétrico  
Fuente: Elaboración propia

El diseño del prototipo de kit colorimétrico de 355 mm de largo, 275 mm de ancho y 100 mm de alto; se realizó considerando principalmente la facilidad de traslado asegurando los componentes del mismo, porque está orientado a utilizarse para realizar ensayos en campo.

El kit permitirá saber si la cantidad de boro en el agua es la adecuada para irrigar los cultivos. El estándar de calidad ambiental (ECA) para el agua de riego de vegetales es 1 mg/L [3], por lo que, si el resultado empleando el kit colorimétrico es menor o igual a ese valor, podríamos decir que la concentración de boro en el agua es la adecuada, sin embargo se tienen que considerar otros factores como el boro en el suelo y la tolerancia de cada tipo de planta a ese elemento.

Cuando se tenga el kit, se recomienda sacar la caja de tecnopor con las soluciones y el gelpack, colocándolos en un refrigerador hasta que se requiera realizar el ensayo en campo, de esta forma se conservarán las soluciones.

El kit permitirá realizar 10 ensayos en muestras de agua. Si la muestra de agua tomada está turbia, se sugiere realizar un proceso de precipitación en uno de los vasos de precipitado y posteriormente realizar un filtrado con el embudo y el papel filtro.

En caso el complejo de color formado tenga una coloración muy intensa, es recomendable realizar una dilución previa a la formación del complejo de color. A la cantidad conocida de la muestra se deberá agregar una cantidad de agua, con el objetivo de que esté lo más clara posible. Luego se formará el complejo de color para identificar con la escala la concentración de boro, finalmente se deberá multiplicar por el factor de dilución para conocer la concentración de boro en el agua antes de haber realizado la dilución.

### 6.5. Evaluación económica

Se clasificó los componentes del kit colorimétrico en tres grupos: Soluciones, estructura del kit colorimétrico y materiales.

#### a) Soluciones

El kit tendrá dos soluciones, una de azometina-H y ácido ascórbico, y otra que será la solución tampón de pH 5.9. Ambas fueron preparadas siguiendo la metodología descrita en la tablña

La cantidad de reactivos necesaria para preparar 250 mL de la solución tampón y 100 mL de la solución de azometina-H, se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4  
*Cantidad de reactivos*

<b>Solución</b>	<b>Reactivos</b>	<b>Cantidad</b>
Azometina-H 0.9% y ácido ascórbico 2%	Azometina-H	0.9 g
	Ácido ascórbico	2 g
	Agua destilada	100 mL
Tampón pH 5.9	Acetato de amonio	62.5 g
	EDTA-Na <sub>2</sub>	3.8 g
	Ácido acético glacial	31 mL
	Agua destilada	250 mL

Fuente: Elaboración propia

Los precios unitarios de cada reactivo se muestran en la Tabla 6. Estos fueron calculados utilizando los precios y las cantidades mostradas en la Tabla 5.

Tabla 5  
Precios de reactivos en tiendas de internet y distribuidores locales

Reactivos	Cantidad	Precio (S/)
Azometina-H	10 g	1,710.00
Ácido ascórbico	100 g	220.00
Acetato de amonio	500 g	240.00
EDTA-Na2	100 g	170.00
Ácido acético glacial	1000 mL	110.00
Agua destilada	1000 mL	2.00

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6  
Precios unitarios de reactivos

Reactivos	Cantidad	Precio (S/)
Azometina-H	1 g	171.00
Ácido ascórbico	1 g	2.20
Acetato de amonio	1 g	0.48
EDTA-Na2	1 g	1.70
Ácido acético glacial	1 mL	0.11
Agua destilada	1 mL	0.002

Fuente: Elaboración propia

Conociendo la cantidad necesaria de reactivos (Tabla 4) y los precios unitarios para cada uno de ellos (Tabla 6) se calculó el costo total para la solución de azometina-H (Tabla 7) y para la solución tampón (Tabla 8) para un volumen de 100 mL y 250 mL, respectivamente.

Tabla 7  
Costo total para preparar 100 mL de solución de azometina-H 0.9% y ácido ascórbico 2%

Descripción	Cantidad	Precio unitario (S/)	Total (S/)
Agua destilada	100 mL	0.0020	0.20
Azometina-H	0.9 g	171.00	153.90
Ácido ascórbico	2 g	2.20	4.40
			<b>158.50</b>

Fuente: Elaboración propia

Tabla 8  
Costo total para preparar 250 mL de solución tampón pH 5.9

Descripción	Cantidad	Precio unitario (S/)	Total (S/)
Agua destilada	250 mL	0.002	0.50
EDTA-Na2	3.8 g	1.70	6.46
Acetato de amonio	62.5 g	0.48	30.00
Ácido acético glacial	31 mL	0.11	3.41
			<b>40.37</b>

Fuente: Elaboración propia

El diseño del kit propuesto, que se detalla en la parte metodológica, sólo contiene 3 envases de 10 mL, uno con la solución de azometina-H y dos envases con la solución tampón.

Utilizando el costo total de las Tablas 7 y 8, se calculó el costo para 10 mL de la solución de azometina-H y 20 mL de la solución tampón, siendo S/ 15.85 y S/ 3.23, respectivamente. Adicionalmente para determinar el costo total de las soluciones, se consideró el precio de los 3 envases de plástico de 3 mL (S/ 1.50), haciendo un total de S/ 20.58.

#### b) Estructura del kit

Se consideró en este grupo el maletín de polipropileno, la caja térmica de tecnopor y la esponja negra para mantener fijos los materiales, obteniendo un costo total de S/ 73.20 como se observa en la Tabla 9. Los precios se obtuvieron en tiendas de internet y puntos de venta locales.

Tabla 9  
*Costo total de la estructura el kit*

<b>Descripción</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Precio unitario (S/)</b>	<b>Total (S/)</b>
Maletín de polipropileno de 355 x 275 x 100 mm	1	51.20	51.20
Caja térmica de tecnopor de 100 x 100 x 43 mm	1	8.00	8.00
Plancha de esponja de 50 x 50 cm de 2"	2	7.00	14.00
			<b>73.20</b>

Fuente: Elaboración propia

#### c) Materiales

En este grupo se incluyó los materiales necesarios para poder tratar las muestras de agua en caso sea necesario, los materiales para realizar las mezclas y la formación del complejo de color, así como también los materiales para poder determinar la concentración de boro en la muestra analizada. Se calculó un costo total de S/ 35.33 como se muestra en la Tabla 10.

Tabla 10  
Costo total de los materiales

Descripción	Cantidad	Precio unitario (S/)	Total (S/)
Cuentagotas de vidrio de 1 mL graduado	3	1.48	4.43
Embudo de plástico de 50 mm de diámetro	1	3.00	3.00
Vaso de precipitado de plástico de 50 mL	2	3.00	6.00
Tubo de ensayo de plástico de 15 mL graduado con tapa con rosca	1	1.50	1.50
Tubo de ensayo de vidrio sin graduación de 6 mL	1	2.48	2.48
Gelpack reutilizable de 7.62 cm x 7.62 cm	1	7.73	7.73
Papel filtro GE Whatman grado 1 de 110 mm de diámetro	10	0.38	3.80
Caja para el papel filtro	1	0.40	0.40
Escala de color en forma de abanico	1	6.00	6.00
			<b>35.33</b>

Fuente: Elaboración propia

El costo total del prototipo de kit colorimétrico se calculó en función de los costos de soluciones, estructura del kit y materiales, siendo un total de S/ 129.12.

Considerando una utilidad de 20 % y el Impuesto General a las Ventas (IGV) de 18 %, el precio de venta del kit colorimétrico propuesto es de S/ 182.83.

En los laboratorios especializados con acreditación de la ciudad de Arequipa, el precio de realizar un análisis espectrofotométrico con azometina-H es de aproximadamente S/ 84.00 por muestra. El kit propuesto permitirá realizar el ensayo 10 veces, con un precio de S/ 18.28 por muestra.

A diferencia del método espectrofotométrico, el kit colorimétrico sólo permitirá determinar una concentración aproximada de boro en la muestra de agua analizada. Cabe resaltar que el kit colorimétrico diseñado ofrece la posibilidad de realizar ensayos *in situ*, a diferencia del método espectrofotométrico, ya que este requiere un equipo que debe ser utilizado en un laboratorio o en un ambiente con las condiciones adecuadas para evitar dañar el equipo.

Como se muestra en la Tabla 5 los reactivos no se venden por unidad, sino en cantidades establecidas por el vendedor; es por ello que se calculó la cantidad de veces que se podría preparar la solución de azometina-H (100 mL) y la

solución tampón (250 mL) en función a las cantidades que venden los proveedores por cada reactivo, como se muestra en las Tablas 11 y 12, respectivamente.

Tabla 11  
*Cantidad de veces que se podría preparar 100 mL de la solución de azometina-H en función de cada reactivo*

<b>Descripción</b>	<b>Cantidad de venta</b>	<b>Cantidad necesaria para 100 mL</b>	<b>Cantidad de veces que se podría preparar la solución</b>
Azometina-H	10 g	0.9	Hasta 11 veces
Ácido ascórbico	100 g	2 g	Hasta 50 veces

Fuente: Elaboración propia

Tabla 12  
*Cantidad de veces que se podría preparar 250 mL de la solución tampón en función de cada reactivo*

<b>Descripción</b>	<b>Cantidad de venta</b>	<b>Cantidad necesaria para 250 mL</b>	<b>Cantidad de veces que se podría preparar la solución</b>
EDTA-Na <sub>2</sub>	100 g	3.8 g	Hasta 26 veces
Acetato de amonio	500 g	62.5 g	Hasta 8 veces
Ácido acético glacial	1000 mL	31 mL	Hasta 32 veces

Fuente: Elaboración propia

Tal como se muestra anteriormente, la azometina-H y el acetato de amonio tienen la menor cantidad de veces que podría prepararse la solución de azometina-H y la solución tampón, respectivamente. Por ese motivo ambos reactivos se consideraron los limitantes para calcular la cantidad de kits colorimétricos que podrían elaborarse.

Como la cantidad de veces que se podría elaborar la solución de azometina-H de 100 mL, es 8 veces, se tendría un total de 800 mL de esa solución. El kit sólo requiere de un envase con 10 mL, es por ello que podrían elaborarse hasta 80 kits.

Por otro lado, con el ácido ascórbico como limitante, se podrían preparar hasta 2000 mL de la solución tampón. El kit colorimétrico diseñado, sólo requiere de dos envases de 10 mL cada uno, es así que podrían elaborarse hasta 100 kits.

El reactivo de azometina-H permite elaborar una menor cantidad de kits colorimétricos en relación al ácido ascórbico, por ese motivo se calculó el costo total para la elaboración de 80 kits.

Para el costo de las soluciones se consideraron los precios y las cantidades que ofrecen los proveedores como se detalló previamente en la Tabla 5. El costo total de las soluciones considerando 3000 mL de agua destilada y el precio de 240 envases de 10 mL a S/ 0.5 se muestra en la Tabla 13.

Tabla 13  
Costo de soluciones para 80 kits colorimétricos

<b>Reactivos</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Precio (S/)</b>
Azometina-H	10 g	1,710.00
Ácido ascórbico	100 g	220.00
Acetato de amonio	500 g	240.00
EDTA-Na2	100 g	170.00
Ácido acético glacial	1000 mL	110.00
Agua destilada	3000 mL	6.00
Envases de 10 mL	240 unid.	120.00
		<b>2,576.00</b>

Fuente: Elaboración propia

El costo de la estructura y los materiales para los 80 kits fue de S/ 5,856.22 y S/ 2,826.69, respectivamente; éstos se calcularon a partir de los costos de las Tablas 9 y 10, que están relacionados a la elaboración de un sólo kit.

Agregando el costo de las soluciones, se calculó el costo total de S/ 11,134.91 para elaborar 80 kits colorimétricos.

Considerando el precio de venta de S/ 182.83, que se menciona en párrafos anteriores, se deben vender 61 kits para poder cubrir todos los costos que se consideraron previamente.

## 7. Conclusiones y recomendaciones

### **Conclusiones**

Se elaboró una estructura para tomar fotografías tal como se detalló en la parte metodológica y en los resultados. La estructura permitió tomar buenas fotografías del complejo coloreado de la azometina-H y el boro que estaba contenido en una celda de cuarzo.

Luego de elaborar una curva de calibración a partir del complejo de color de la azometina-H y el boro desde 0.5 mg/L a 8 mg/L se obtuvo un coeficiente de determinación de 0.9997 y límites de cuantificación y detección de 0.1008 mg/L y 0.0953 mg/L, respectivamente. Dicha curva de calibración, sirvió para tomar fotografías en cascada del complejo de color a esas concentraciones y elaborar la escala de color que fue impresa a láser en papel *couché* de alto gramaje.

El kit colorimétrico que se diseñó en Autodesk Inventor Professional, servirá para determinar boro en muestras de agua. El kit tiene los materiales y soluciones necesarias para realizar 10 ensayos en campo.

Luego de identificar los costos para la elaboración del kit colorimétrico se calculó el precio de venta del kit en mención, siendo S/ 182.83 soles. Considerando ese precio de venta, para recuperar el dinero utilizado para cubrir todos los costos de la elaboración de 80 kits colorimétricos, se tienen que vender 61.

### **Recomendaciones**

- Realizar pruebas en campo con el kit colorimétrico.
- Realizar pruebas para determinar boro en suelos y comparar los resultados con el método espectrofotométrico.

## 8. Bibliografía

- [1] F. Shireen, M. Azher Nawaz, C. Chen , Q. Zhang, Z. Zheng, S. Hamza, J. Sun, H. Cao, Y. Huang y Z. Bie, «Boron: Functions and Approaches to Enhance Its Availability in Plants for Sustainable Agriculture,» *International Journal of Molecular Sciences*, vol. 19, nº 7, 24 Junio 2018.
- [2] A. Alharati, Y. Swesi, K. Fiatty y C. Charcosset, «Boron removal in water using a hybrid membrane process of ion exchange resin and microfiltration without continuous resin addition,» *Journal of Water Process Engineering*, vol. 17, pp. 32-39, Junio 2017.
- [3] M. d. Ambiente, *Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM*, Lima, 2017.
- [4] N. Kabay, M. Bryjak y N. Hilal, *Boron Separation Processes*, Amsterdam: Elsevier, 2015.
- [5] A. Sapkota, E. C. Meccage, R. Stougaard, J. P. Tanner, D. Peterson y J. A. Torrión, «Boron Fertilization of Irrigated Alfalfa in Montana,» *Forage & Grazinglands*, vol. 4, pp. 1-8, Junio 2018.
- [6] B. Ghasemidehkordi, A. A. Malekirad, H. Nazem, M. Fazilati, H. Salavati y M. Rezaei, «Arsenic and Boron Levels in Irrigation Water, Soil and Green Leafy Vegetables,» *International Journal of Vegetable Science*, vol. 24, pp. 115-121, 2018.
- [7] A. Shah, X. Wu, A. Ullah, S. Fahad, R. Muhammad, L. Yan y C. Jiang, «Deficiency and toxicity of boron: Alterations in growth, oxidative damage and uptake by citrange orange plants,» *Ecotoxicology and Environmental Safety*, vol. 145, pp. 575-582, Noviembre 2017.
- [8] Y. Zhang, W. Wang, R. Li, E. Zhang, Z. Li, L. Tang, B. Han, X. Hou y J.-J. Wang, «A novel rhodamine-based colorimetric and fluorometric probe for simultaneous detection of multi-metal ions,» *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular*, vol. 230, Abril 2020.
- [9] C. Chatterjee, S. Sethi, V. Mukherjee, P. K. Sahu y N. Behera, «Triazole derived azo-azomethine dye as a new colorimetric anion chemosensor,» *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, vol. 226, Febrero 2020.
- [10] Z. Li, C. Liu, S. Wang, L. Xiao y X. Jing, «Visual detection of cyanide ion in aqueous medium by a new chromogenic azo-azomethine chemosensor,» *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, vol. 210, pp. 321-328, Marzo 2019.
- [11] A. Choodum, W. Sriprom y W. Wongniramaikul, «Portable and selective colorimetric film and digital image colorimetry for detection of iron,» *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, vol. 208, pp. 40-47, Febrero 2019.
- [12] J.-J. Xiong, P.-C. Huang, C.-Y. Zhang y F.-Y. W. Wu, «Colorimetric detection of Cu<sup>2+</sup> in aqueous solution and on the test kit by 4-aminoantipyrine derivatives,» *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 226, pp. 30-36, Abril 2016.

- [13] F. Pena-Pereira, «A paper-based colorimetric assay with non-instrumental detection for determination of boron in water samples,» *Talanta*, vol. 208, p. Febrero, 2020.
- [14] C. Boonkanon, K. Phatthanawiwat, W. Wongniramaikul y A. Choodum, «Curcumin nanoparticle doped starch thin film as a green colorimetric sensor for detection of boron,» *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, vol. 224, Enero 2020.
- [15] K. Sabally, J. K. Whalen y B.-L. Ma, «Microplate assay for boron analysis in soil and plant tissue,» vol. 97, nº 2, pp. 334-338, Abril 2017.
- [16] P. González, A. Sixto y M. Knochen, «Multi-pumping flow system for the determination of boron in eye drops, drinking water and ocean water,» *Talanta*, pp. 399-404, Mayo 2017.
- [17] P. Palma, R. Calderón, M. Godoy y M. A. Rubio, «Comparative study of two analytical methods to the determination of boron in leachate samples from sanitary landfills and groundwater for routine analysis and feasible on-site environmental monitoring,» *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, pp. 627-635, Mayo 2016.
- [18] M. Ashraf y S. Ahmed, «Digital imaging devices as sensors for iron determination,» *Food Chemistry*, vol. 274, p. 360–367, 2019.
- [19] Z. Marczenko y M. Balcerzak, Separation, Preconcentration and Spectrophotometry in Inorganic Analysis, vol. 10, Amsterdam: Elsevier, 2000.
- [20] R. E. Krebs, The History and Use of Our Earth's Chemical Elements: A Reference Guide, Segunda ed., Londres: Greenwood Press, 2006.
- [21] P. Ahmad, Plant Metal Interaction: Emerging Remediation Techniques, Amsterdam: Elsevier, 2015.
- [22] Handbook of plant nutrition, Nueva York: Taylor & Francis Group, 2007.
- [23] J. Wolska y M. Bryjak, «Methods for boron removal from aqueous solutions — A review,» *Desalination*, vol. 310, pp. 18-24, 2013.
- [24] M. Landi, T. Margaritopoulou, I. Papadakis y F. Araniti, «Boron toxicity in higher plants: an update,» *Planta*, vol. 250, pp. 1011-1032, 2019.
- [25] M. Brdar-Jokanović, «Boron Toxicity and Deficiency in Agricultural Plants,» *International Journal of Molecular Sciences*, vol. 21, nº 4, pp. 1424-1484, 2020.
- [26] E. Merdivan, Y. Benibol y S. Seyhan, «Fluorimetric detection of boron by azomethine-H in micellar solution and sol-gel,» *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, vol. 71, pp. 2045-2049, 2012.
- [27] S. Akman, B. Demirata-Ozturk y N. Tokman, «Atomic Absorption Spectroscopy,» de *Food Toxicants Analysis*, Turquía, Elsevier Science, 2007, pp. 637-640.
- [28] J. Vogl, M. Rosner y W. Pritzkow, «Development and validation of a single collector SF-ICPMS procedure for the determination of boron isotope ratios in water and food samples,» *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, vol. 26, pp. 861-869, 2011.

- [29] A. Farhat, A. Farhat y H. Arafat, «Analytical techniques for boron quantification supporting desalination processes: A review,» *Desalination*, vol. 310, pp. 9-17, 2013.
- [30] O. V. Zenkina, *Nanomaterials Design for Sensing Applications*, Amsterdam: Elsevier, 2019.
- [31] K. Mitsubayashi, O. Niwa y Y. Ueno, *Chemical, Gas, and Biosensors for Internet of Things and Related Applications*, Amsterdam: Elsevier, 2019.
- [32] P. Anzenbacher, P. Lubal, P. Buček, M. Palacios y M. Kozelkova, «A practical approach to optical cross-reactive sensor arrays,» *Chemical Society Reviews*, vol. 39, pp. 3954-3979, 2010.
- [33] L. You, D. Zha y E. Anslyn, «Recent Advances in Supramolecular Analytical Chemistry Using,» *American Chemical Society*, vol. 115, n° 15, pp. 7840-7892, 2015.
- [34] N. Laschuk , I. Ebralidze, S. Quaranta, S. Kerr , J. Egan, S. Gillis, F. Gaspari , A. Latini y O. Zenkina, «Rational design of a material for rapid colorimetric Fe<sup>2+</sup> detection,» *Materials & Design*, pp. 18-25, 2016.
- [35] Machery Nagel, «Machery Nagel: Kits de ensayo para el análisis de aguas,» [En línea]. Available: [http://leacsa.com.mx/pdf/03\\_visocolor%20kits%20de%20ensayo.pdf](http://leacsa.com.mx/pdf/03_visocolor%20kits%20de%20ensayo.pdf). [Último acceso: 11 Octubre 2020].
- [36] MERCK, «MERCK: Water, Food & Environmental Analytics,» [En línea]. Available: [https://www.merckmillipore.com/PE/es/product/Boron-Test,MDA\\_CHEM-114839#anchor\\_BRO](https://www.merckmillipore.com/PE/es/product/Boron-Test,MDA_CHEM-114839#anchor_BRO). [Último acceso: 11 Octubre 2020].
- [37] C. Horngren, S. Datar y R. Madhav, *Contabilidad de costos - Un enfoque general*, Décimocuarta ed., México: Pearson, 2012.
- [38] J. García Colín, *Contabilidad de costos*, Tercera ed., México: Mc Graw Hill, 2008.
- [39] D. Hansen y M. Mowen, *Administración de costos*, Santa Fe: CENGAGE Learning, 2007.
- [40] M. P. Chilibingua Jaramillo, *Costos: Modalidad órdenes de producción*, Ecuador: UTN, 2017.
- [41] D. Harris, *Análisis químico cuantitativo*, Nueva York: Reverté, 2016.
- [42] C. R. Portocarrero Osorio, *VALIDACIÓN DE TRES MÉTODOS ANALÍTICOS PARA LA DETERMINACIÓN DEL BORO POR ESPECTROFOTOMETRÍA VISIBLE*, Arequipa: Universidad Nacional de San Agustín, 2018.
- [43] S. A. Ramírez Revilla, *Diseño, construcción y evaluación de un electrodo ión selectivo para boro*, Arequipa: Universidad Católica de Santa María, 2011.
- [44] L. Figueroa Tagle, Y. Zapata Cortés, C. Urbina Alonso, H. Escobar Araya y N. Lara Henríquez, *Normalización de competencias analíticas para la cuantificación del elemento Boro en el sistema agua-suelo-planta*, Arica: Universidad de Tarapacá, 2010.

- [45] S. Klouche, J. Cournapeau y P. Hardy, «Material costs of anterior cruciate ligament reconstruction with hamstring tendons by two different techniques,» *Orthopaedics & Traumatology: Surgery & Research*, vol. 99, pp. 196-201, 2013.
- [46] G. M. Romero Mariscal, *Validación de un método analítico para la cuantificación de boro en aguas por espectrofotometría*, Arequipa: Universidad Autónoma del Sur, 2020.
- [47] D. Ortiz Romero y S. Ramirez Revilla, «DISCOLORATION OF WATER CONTAMINATED BY THE TEXTILE DYE RED TS3B UTILIZING ULTRAVIOLET RADIATION AND ZnO AS A PHOTOCATALYST,» *Journal of the Chilean Chemical Society*, vol. 63, n° 4, pp. 4261-4264, 2018.
- [48] I. Yakub Mohammed, «Analytical Determination of Boron in Irrigation Water Using Azomethine-H: Spectrophotometry,» *Journal of Applied Chemistry*, vol. 7, n° 3, pp. 47-51, 2014.