

Dispositivo electrónico de bajo costo
para detectar aguas contaminadas por
sulfato de cobre y aguas duras.

Arnulfo Vladimir Castellanos Jaramillo

Tesis de Ingeniería en Electrónica

Universidad de Sonora

Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



**"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"**



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess

Índice

Capítulo I

Presentación del problema

Versión oficial	3
Versión en la prensa	8
Vigencia de este trabajo	10
Capacidad de respuesta económica para estudios técnicos de alto nivel	12

Capítulo II

Distintas técnicas para análisis del agua

Comentarios generales	15
Agua para consumo humano	17
Oferta de ^{equipo} en el mercado	17
Observaciones	19

Capítulo III

Análisis de las muestras de agua del Río Sonora

Teoría física de la absorción de luz con enfoque en longitudes de onda infrarrojas	25
Bases moleculares del proceso de absorción de luz	25
Ley de Beer-Lambert	27
El caso del sulfato de cobre	30

Capítulo IV

Trabajo experimental y resultados

Caracterización de LEDs	34
Proceso experimental:	45
Descripción de los dos sistemas:	48
Mediciones y análisis. Intervalo de conducta lineal y de conducta no lineal	54

Análisis del pH de algunas muestras de agua	61
Proceso de medición y resultados	62
Conclusiones	68
Referencias	71

Introducción

El objetivo de este trabajo es presentar el diseño y construcción de un dispositivo electrónico de bajo costo que tiene como propósito detectar contaminantes diluidos en agua. Se aplican principios ópticos mediante la absorción de luz en el agua. El proceso de medición consiste en comparar la absorción con una muestra de referencia. Acto seguido se traduce dicha intensidad a voltaje. El único requisito es que los materiales contaminantes tengan espectro de absorción de ondas electromagnéticas en el infrarrojo cercano. Se muestra el funcionamiento del dispositivo y cómo se probó en diversas muestras de agua. El mismo procedimiento es aplicable en otras regiones del espectro, siempre y cuando se disponga en el mercado de los emisores de LED necesarios.

El principio demostrado experimentalmente en el infrarrojo podría abrir la posibilidad de crear un sistema que permita estudiar e identificar con mayor resolución y diferenciación, los contaminantes presentes en el agua que se analice.

Este trabajo surge como necesidad a partir del incidente de contaminación de los ríos Bacanuchi y Sonora que tuvo lugar en agosto de 2014. Se observó que las poblaciones de la rivera de estos no cuentan con los recursos tecnológicos ni la infraestructura básica para saber sobre el posible riesgo al que pudieran estar expuestos.

Se tomó conciencia de que los municipios afectados tampoco tienen los recursos económicos suficientes para adquirir instrumentos adecuados para realizar los estudios y pruebas in situ. Esta situación motiva la búsqueda de una alternativa económica que pueda ser operada por una persona con conocimientos mínimos y capacitación adecuada como para registrar y reportar resultados confiables.

Este trabajo se organiza como sigue:

En el primer capítulo se presenta el problema de la contaminación del agua del río Sonora en su versión oficial, y también, en otra reflejada en la prensa; se hace ver que la contaminación del agua por parte de empresas mineras es común en el mundo, de modo que es algo para lo que siempre debemos estar prevenidos. También se exponen datos que demuestran la ausencia de recursos económicos y de preparación técnica para enfrentar esta clase de derrames tóxicos.

En el segundo capítulo se presentan distintas técnicas para analizar el agua y se muestra que sí existen métodos e instrumentos de precisión muy variada, pero con la desventaja de que son sumamente caros y de que se necesita una preparación suficientemente alta como para que ayuden a resolver las necesidades de conocimiento por parte de la población.

En el tercer capítulo se presenta la teoría física de la absorción de luz. Se explica la ley de Beer-Lambert y se discute el caso particular del sulfato de cobre. Que fue tomado como indicador para graduar una escala de las intensidades que se manejan en el aparato diseñado.

En el cuarto capítulo se explica el trabajo experimental, la obtención de resultados, el análisis de los mismos para identificar dónde está la respuesta lineal del dispositivo y se encuentra que ésta es lo suficientemente amplia para realizar el trabajo que se ha propuesto. Se presentan los resultados en tablas y también las conclusiones. Con precios del año 2016, se concluye que la replicación de cinco dispositivos como éste, uno por cada región del espectro, es una inversión aceptable para un municipio pequeño y con presupuesto restringido. También se muestra que las matemáticas y la física necesaria para manejar el aparato no es demasiado complicada, de modo que es factible la etapa de entrenamiento de una persona para que adquiera las competencias y conocimientos que le permitan realizar el procedimiento de registro y reporte de las mediciones o monitoreo de cara región.

Capítulo 1

Presentación del problema

Versión oficial

1. El 06 de agosto de 2014 se derramaron 40,000 metros cúbicos de sulfato de cobre (CuSO_4) acidulado en un arroyo llamado Tinajas. Para dar una idea de este volumen, en la foto número 1 se muestra un tinaco de uso doméstico de 1,000 litros. El contaminante derramado corresponde a 40,000 de esos tinacos.
2. La SEMARNAP afirma que el derrame se origina en instalaciones de la Empresa Buenavista del Cobre, perteneciente a Grupo México. Según Wikipedia, se llama Grupo México S.A. de C.V. y posee la compañía minera más grande de México y es la tercera productora más grande del mundo. Es dueña también del Ferrocarril Mexicano (FERROMEX). Es propiedad de Germán Larrea Mota Velasco y según el portal businessweek.com reportó ingresos en el 2012 por 10,100 millones de dólares.
3. El 7 de agosto de 2014, los habitantes de la zona informaron a la Unidad Estatal de Protección Civil del Gobierno de Sonora, que la coloración del Río Bacanuchi era inusual.
4. El 8 de agosto siguiente, la empresa notificó telefónicamente del incidente a la Autoridad Federal y formalizó la notificación hasta el 12 de agosto.
5. La Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) afirma que procedió de inmediato a realizar una visita técnica en el lugar del incidente y elaboró un Dictamen Técnico.

6. CONAGUA afirma que en dictamen técnico estableció que “... el derrame se ocasionó por la falla en el amarre de un tubo de polietileno (tubificación) en una de las piletas de lixiviados y por la falta de una válvula en la piletta de demasías, imputable a la empresa.”
7. Según el documento citado en la referencia 1 la empresa argumentó públicamente que el percance se debió a lluvias superiores a la media de precipitaciones en la región.
8. El documento citado afirma que los reportes del Servicio Meteorológico Nacional (CONAGUA) demuestran que la afirmación de la empresa es “... absolutamente falso.”



Figura 1. El volumen de tóxico derramado equivale a 40 000 tinacos de 1 000 litros como el de esta fotografía.

El documento de CONAGUA de fecha agosto de 2014 establece también que el derrame alcanzó a los siguientes cuerpos de agua:

Cuerpo de agua	Observaciones
Arroyo Tinajas	17.6 kilómetros de longitud.
Río Bacanuchi	64 kilómetros de longitud.
Río Sonora	190 kilómetros de longitud.
Presa El Molinito	Almacenamiento de 15.4 millones de m ³ , cerrada precautoriamente sin que a la fecha se hayan presentado evidencias de contaminación. Se refieren a agosto de 2014.

Tabla I. Datos geográficos de la zona afectada.

El documento referido de la SEMARNAT⁽¹⁾ también afirma que CONAGUA aplicó Protocolos de Atención de Emergencias Hidroecológicas consistentes en el análisis, monitoreo y prueba a partir del 8 de agosto de 2014 y las siguientes medidas:

1. Restringió el uso del agua en el río y en los 322 pozos y norias ubicadas 500 m a cada margen del río.
2. Muestreo de remanentes de la pileta y establecimiento de 21 puntos de medición a lo largo de los ríos para monitorear los niveles de contaminación.

Reportan que al 24 de agosto se habían realizado 1,020 muestreos analizados por laboratorios certificados en Hermosillo y la Ciudad de México, encontrando el siguiente resultado:

1. Los contaminantes encontrados, entre otros, son los siguientes: cobre, arsénico, aluminio, cadmio, cromo, fierro, manganeso y plomo, cuyos niveles han estado fuera de las normas ecológicas, de salud y del estado de la calidad del río previo al derrame.

CONAGUA afirmó en su documento que había visitado el arroyo Tinajas, encontrando un bordo de contención 6 kilómetros aguas abajo de la pileta. Indicó que había muestras de fuga de material contaminado. Un mapa del área afectada se presenta enseguida:

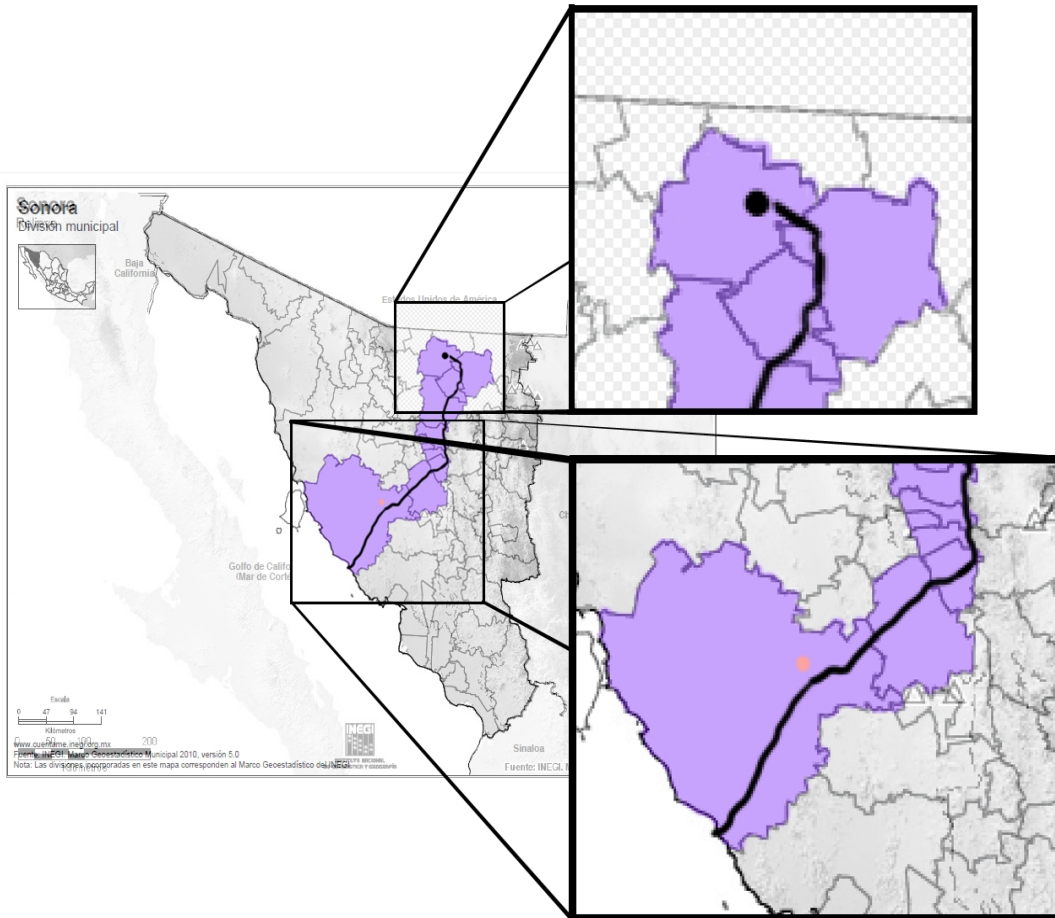


Figura 2. Mapa de la zona afectada por el derrame de contaminantes.

Una ilustración más detallada de las poblaciones afectadas se presenta en el siguiente mapa:

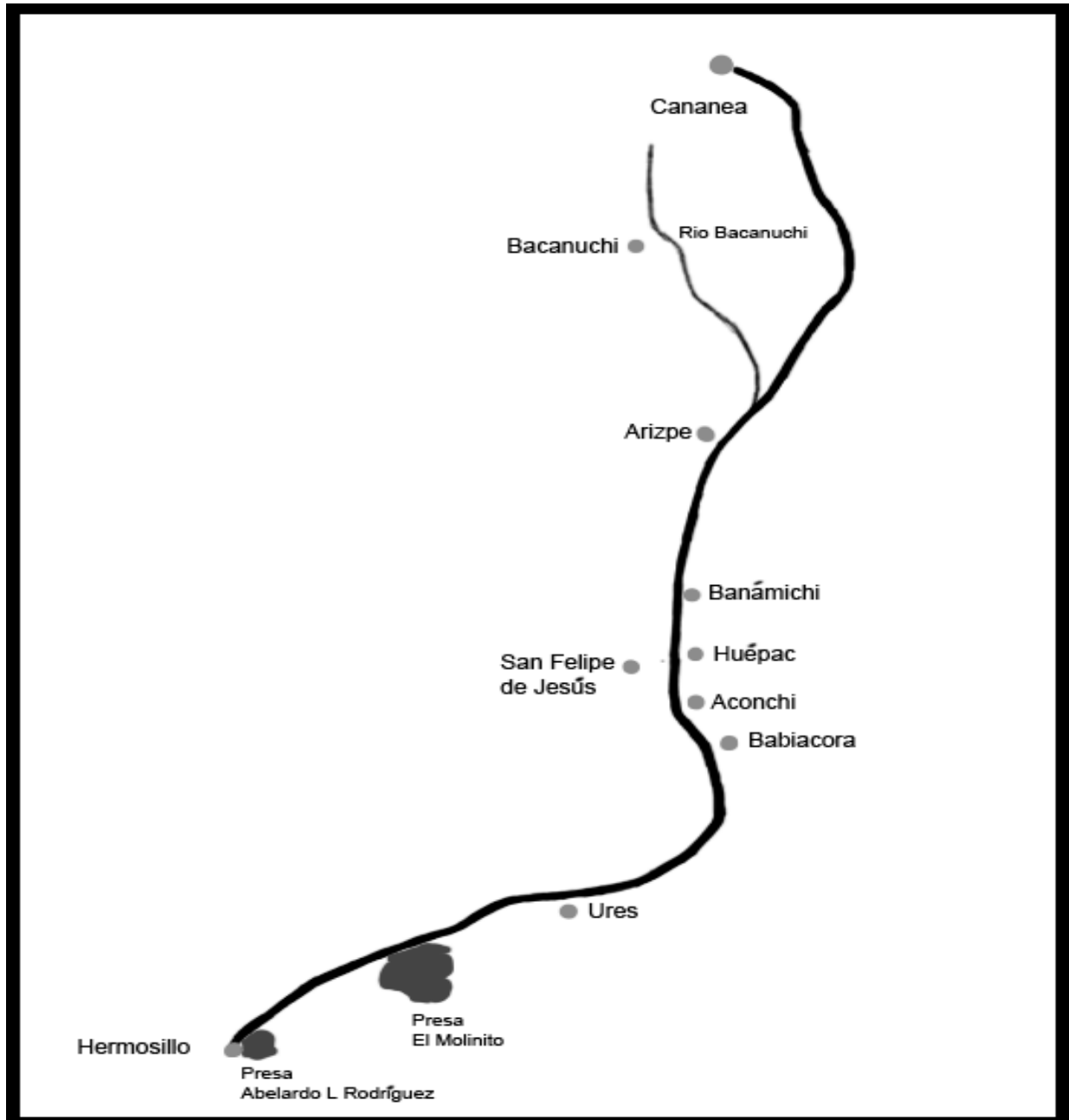


Figura 3. Mapa de las poblaciones afectadas.

Versión en la prensa

La revista digital: CRÓNICA AMBIENTAL⁽²⁾, que se puede consultar en: <https://www.cronicaambiental.com.mx/>, publicó un reportaje dedicado al evento anterior, fechado en octubre de 2014. Señalaron que "... aunque el río ya tiene una apariencia normal, la vida y las economías de los siete municipios de las riberas, se han paralizado, no obstante el fideicomiso de 2,000 millones de pesos ordenado por el gobierno federal."

El ambiente entre la población de los pueblos del río era de desconsuelo y de incertidumbre ante las pérdidas económicas.

Los reporteros afirmaron: "A lo largo de nuestro recorrido, encontramos vacíos los pequeños hoteles, lo mismo que los modestos restaurantes. "Ahora los únicos que vienen son los inspectores", dice Marcela, la propietaria de la fonda que lleva su nombre en Guadalupe de Ures. En la orilla de la carretera, la venta de productos regionales se ha reducido al mínimo, Felipe, de 50 años, ha vendido dos docenas de elotes; en una mañana normal ya hubiera vendido dos millares. "Nunca le vi nada al río", dice. "El agua se empuerca porque rueda". Las autoridades "... ordenaron a los agricultores y ganaderos de los siete municipios que conforman la ruta del río Sonora alejar a sus familias del río, así como prohibir el uso de 322 pozos y norias, la economía de esta región se ha trastornado casi hasta el punto de la parálisis. Estos siete municipios son, de sur a norte: Ures, Baviácora, Aconchi, San Felipe de Jesús, Huépac, Banámichi y Arizpe."

Según los reporteros, "... poco más de 24 000 personas permanecen en vilo. Hasta el cierre de la edición no podían disponer ni del agua del río, ni de la de los pozos que están a una distancia de hasta 500 metros de la orilla."

Los hechos descritos en el reportaje son distintos a lo mencionado en la versión oficial. Por ejemplo, el señor Martín Peña, presidente de la unidad de riego y de la Sociedad de Productores de Nuez de Banámichi, declaró a los reporteros que él se había enterado del derrame tóxico el viernes 8 de agosto porque recibió una llamada telefónica de su hermano,

que vive en Bacanuchi, quien le informó que se había venido abajo un represo de la mina de Cananea.

En la versión del reportaje las autoridades no sabían qué hacer. Escriben: “Martín colgó y se fue al ayuntamiento para ver si tenían más información. No estaba el presidente, pero sí el secretario, a quien encontró en estado de pánico: “¿Qué hacemos?”, le preguntó el secretario. Según los cálculos que hicieron, en unas cinco horas la crecida con los tóxicos pasaría por ahí.”

El reportaje continua: “Hacia las seis de la tarde Martín bajó acompañado de su esposa a la ribera. Aunque mucha gente del pueblo se había ido de fiesta a Huépac, encontraron a una familia. Les aconsejaron a los niños que no metieran los pies al agua. Algunos momentos después fueron testigos de cómo el río cambió de color. “Era un agua media naranja-amarilla, naranja-cobriza.”

De la investigación de los reporteros se concluye que “No fue sino hasta el lunes 11, cuando se cumplían al menos cinco días del derrame, que la CONAGUA hizo llegar a los siete municipios afectados un oficio, firmado por el director César Lagarda, con la orden de suspender la operación de los pozos de agua.”

Una muestra de la situación en que se encontraban las autoridades y funcionarios es la siguiente afirmación del reportaje citado: “A Carlos Arias, el encargado de Protección Civil, se le vio en misa en Huépac. Al término de la celebración religiosa, Arias se dirigió a la gente para tranquilizarla: la única recomendación era no meterse al río. “Porque si un niño se mete al agua con una cortadita, le va a arder, ...”.

Aparte de los datos anteriores, Crónica Ambiental afirma, en el reportaje de la referencia (2), que la minería y la contaminación van de la mano. Enseguida se presentan ocho hechos históricos mencionados por el reportaje:

- 1990, mina de oro Brewer, Las Lluvias de Carolina del Sur desbordaron 40 millones de litros de solución cianurada de la firma Brewer Gold Company y contaminaron el arroyo Little Fork. Las autoridades reportaron 11 000 peces muertos.
- 1991-1992, mina de oro Summitville, Estados Unidos. Una fuga accidental de una mina a cielo abierto, perteneciente a Galactic Resources Ltd., en Colorado, acabó con los peces del río Alamosa.
- Agosto de 1995, mina de oro Omai, en Guyana, la empresa Omai Gold Mine derramó 3 000 millones de litros de una mezcla de agua, cianuro y metales. La vida acuática de la cuenca del río Essequibo desapareció.
- Abril de 1998, mina de zinc Los Frailes, España. Las piletas de la empresa sueca Boliden, que estaban al doble de su capacidad, colapsaron y vertieron siete millones de toneladas de lodo tóxico en Aznalcóllar, Sevilla, afectando 4 600 hectáreas de cultivos en las cercanías de los ríos Agrio y Guadiamar.
- Junio de 1998, minas de oro Santa Rosa, Panamá. Se desborda una pileta de lixiviación en la provincia de Veraguas, Panamá. Resultan afectados cerca de 350 000 habitantes y se extrae media tonelada de peces muertos del río Corita.
- Enero de 2000, mina de oro Aurul Baia Mare, Rumania. 100 000 litros de cianuro cayeron al río Szamos cuando las paredes del contenedor se vinieron abajo. El líquido invadió también el río Tisza. El 95% de la fauna de este último río quedó devastada y se contabilizaron veinte toneladas de peces muertos.
- Marzo de 2003, mina de oro San Andrés, Honduras. Entre 300 y 500 galones de solución de cianuro de sodio fueron derramados al río Lara. En menos de diez minutos murieron 18 000 peces, ranas, cangrejos y libélulas. En 2009, en el mismo río, la misma empresa vertió 150 galones del mismo líquido.
- Agosto de 2013, mina de oro Mulatos, México. Las aguas del río Yaqui recibieron 3 000 litros de cianuro cuando una pipa se volcó. Hubo 8 personas intoxicadas y todos los pozos en un radiode 80 kilómetros fueron cancelados.

La contaminación del agua es un hecho real, permanente en la vida moderna. Por lo tanto, es necesario estar preparados para esta clase de eventualidades. Se han presentado y seguirán presentándose.

Justificación

En esta sección se hace ver por qué, a más de dos años del derrame de tóxicos, se hace necesario disponer permanentemente de instrumentos y personal calificado que sin menosprecio de la confiabilidad, no requiera de alto presupuesto y que se pueda mantener en las zonas afectadas.

La población no confía en las declaraciones oficiales: El portal de noticias “Animal Político” cierra un reportaje fechado en octubre de 2015⁽³⁾ diciendo que “... los habitantes desconfían de la calidad del agua y acusan que han tenido afectaciones en la salud y cosechas.”

El portal mencionado afirma conocer una “... evaluación hecha por un laboratorio de certificación internacional encargada por la organización Proyecto sobre Organización, Desarrollo, Educación e Investigación (PODER), que lleva la defensa de los pobladores afectados.” A partir de ésta se concluiría que “En agosto de 2014, cuando los desechos químicos de la mina Buenavista del Cobre contaminó el Río Sonora, la presencia de nueve metales en el agua superaba hasta 31 mil veces los niveles permitidos en la norma oficial, según revela un análisis externo.”

De acuerdo a la información citada por el portal de noticias. “Los resultados del análisis de un laboratorio extranjero determinaron que el agua presentaba una concentración de Hierro 31 mil 857 veces el nivel de la NOM-127-SSA1-1994; la presencia de Manganeso fue de 5 mil veces más; de Cadmio, casi mil 500 veces más de lo permitido y Arsénico más de 800 veces.”

Evitar la contaminación del agua es de importancia primaria para las autoridades competentes en cada país desarrollado o en desarrollo y las precauciones sobre su cuidado son parte de las políticas públicas. Por eso son frecuentes las imposiciones de límites a la descarga de sustancias peligrosas por su toxicidad, carcinogenicidad, etcétera. Es el caso de los agroquímicos y de los residuos comunes en la práctica moderna de la minería. Es el caso de los pesticidas basados en el uso de compuestos de plomo o de mercurio, como el insecticida conocido con las siglas DDT. Lo mismo ocurre con las prohibiciones por la presencia de cobre, zinc, manganeso, boro y fósforo, que incluso en pequeñas concentraciones son peligrosos para la salud. Ver ⁽⁴⁾.

En el caso de México es necesario tomar en cuenta que el 63% del agua para consumo humano proviene de fuentes superficiales, como son los ríos, los lagos y las presas. La necesidad de protección se extiende a los mantos de agua subterránea, de la cual se estima que viene descendiendo a razón de 6 500 millones de metros cúbicos anuales. En este punto conviene tener presente que la demanda agrícola constituye el 80% del total de la demanda de agua, de donde resulta que no basta con el cuidado del agua en las casas habitación. Ver ⁽⁵⁾.

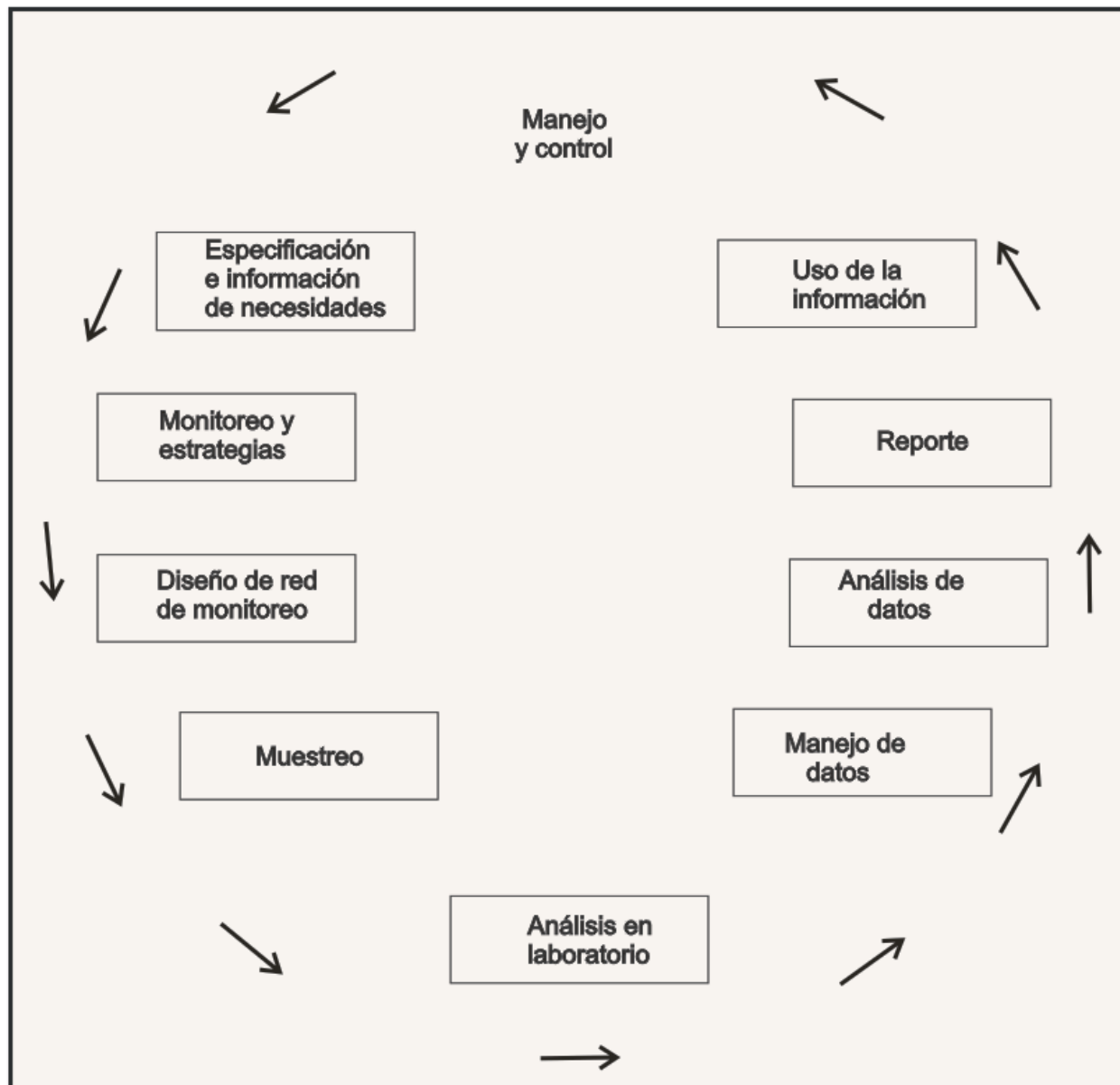
Entre los cuidados que conviene impulsar por medio de políticas públicas están los siguientes:

1. Control de la extracción de aguas subterráneas.
2. Cuidado de los acuíferos y de los flujos hacia ellos.
3. Evaluar y prevenir el impacto de los depósitos de desperdicios en la tierra, como basureros, tiraderos de materiales, etcétera.
4. Evaluar y prevenir el depósito de contaminantes en la tierra provenientes de actividades industriales, domésticas, etcétera. Se incluyen aquí los escurrimientos de líquidos en tierra, de donde resulta la necesidad de controlar las descargas de sustancias en los diversos estratos del subsuelo y de todo aquello que amenace la calidad del agua subterránea.

Sobre los detalles conviene consultar la referencia ⁽⁶⁾

El siguiente diagrama para el flujo de acciones para el control de contaminantes explica ordenadamente las acciones que se deben mantener.

Flujo de acciones para el control de contaminantes



Capacidad de respuesta económica para estudios técnicos de alto nivel

En esta sección se discute la posibilidad de que los municipios afectados en el río Sonora utilicen sus propios recursos para atender el problema con la confianza de la población, o consigan prevenir afectaciones cuando estas dificultades se presentan.

Existen actualmente métodos y técnicas para el análisis de contaminantes del agua ampliamente probadas y utilizadas. Una de las posibilidades es utilizar la espectrofotometría, que requiere del uso de equipo cuyo costo los hace accesibles únicamente en laboratorios de investigación especializados, donde su acceso es restringido por diferentes razones. Entre las cuales se encuentra el que muchos de ellos tienen dificultades para cubrir las pólizas de servicio de los instrumentos que utilizan, de modo que no es fácil que accedan a colaborar, a menos que exista alguna clase de respaldo institucional que funcione como cobertura. Hacerlo motu proprio puede generar dificultades.

Por otra parte, los municipios difícilmente podrían disponer de presupuesto para adquirir este tipo de equipo y mucho menos mantener su operación. En el caso de las poblaciones afectadas por el derrame sobre el río Bacanuchi, los datos son los siguientes:

Municipio	Presupuesto anual 2016 (pesos mexicanos)
Arizpe	\$61,833,139
Banámichi	\$11,016,122
Huépac	\$9,310,253
San Felipe de Jesús	\$7,719,825
Aconchi	\$12,271,093
Baviácora	\$15,816,610
Ures	\$35,463,767

Tabla II. Presupuesto de los municipios afectados por el derrame de tóxicos

Una investigación especializada podría determinar si montos económicos como los anteriores permiten disponer de recursos suficientes para estudios preventivos como los que súbitamente se hicieron necesarios. A primera vista se aprecia que no es así. La siguiente tabla muestra un comparativo entre varias instituciones: el total de municipios afectados, la Universidad de Sonora y Grupo México S.A. de C.V.

Institución o empresa	Montos económicos
Siete municipios afectados en el río Sonora. Suma de presupuesto en 2016	\$153,430,809
Montos dedicados a investigación en la Universidad de Sonora. Año 2015 ⁽⁷⁾	\$231,216,758
Ingresos de Grupo México S.A. de C.V. en 2012	136, 350 millones de pesos (tipo de cambio de 13.50 pesos mexicanos por dólar)

Tabla III. Comparación de la suma de presupuestos de los municipios con los recursos dedicados a investigación en la Universidad de Sonora y los ingresos de Grupo México

Con la propuesta planteada en este trabajo se pretende crear una alternativa económica y de operación simplificada que de acceso a los municipios afectados de una tecnología económica como para mantener un sistema de monitoreo permanente in situ.

Capítulo 2

Distintas técnicas para análisis del agua

Comentarios generales

El agua para consumo humano suele ser analizada para saber si existen contaminantes que podrían poner en riesgo la salud de las personas consumidoras. A partir del conocimiento de las sustancias indeseadas en el agua se puede tomar una decisión sobre la necesidad de tratamiento y también sobre la tecnología más apropiada para resolver el problema.

En el agua se puede encontrar sólidos suspendidos, como es el caso de arena y de virus. Algunas de esas impurezas no se pueden distinguir a simple vista debido a su pequeñez pero se pueden dar descripciones cualitativas sobre la claridad del agua o sobre su apariencia turbia. Sobre su olor y su sabor.

- El sentido del gusto es útil porque permite detectar la presencia de contaminantes desde algunas decenas hasta centenas de partes por millón, pero no ayuda a detectar cuáles contaminantes son los que están presentes.
- La vista puede ayudar porque con base en el color se puede suponer la presencia de ciertos contaminantes, sean estos orgánicos o inorgánicos, pero como en el caso del sentido del gusto, tampoco permite saber con certeza de cuáles contaminantes se trata y mucho menos cuál es su concentración.

Una de las técnicas es la determinación del total de sólidos disueltos. Se basa en la cantidad de materia suspendida que puede ser separada usando filtros para medir la masa de los materiales extraídos. También se puede recurrir al método de secado para eliminar el agua y estudiar el residuo.

Entre los análisis cuantitativos posibles está la conductividad del agua para conocer la presencia de sales. El agua sola, como H_2O , es un aislante, pero la presencia de sales y de otras sustancias químicas, incrementa su conductividad.

Otra posibilidad es la medida del pH, que permite saber si la sustancia bajo estudio es ácida, neutra, o alcalina. Se trata de un parámetro que va desde 0 hasta 14. Su punto medio, 7, es considerada una sustancia neutra en la que el número de átomos de hidrógeno es igual al de oxhidrilos (OH^-). Cuando la cantidad de átomos de hidrógeno supera a las de OH^- , la sustancia se vuelve ácida. Por el contrario, si los átomos de hidrógeno son menos, la sustancia tiende a ser alcalina. Este dato es importante para determinar cómo potabilizar el agua, por ejemplo, si se usan sustancias con compuestos de cloro (método de cloración), las aguas con un pH demasiado alto pueden requerir mayores concentraciones del compuesto tratante, e incluso, cuando se rebasa cierto valor este, la técnica de potabilización deja de ser útil.

Otra técnica se basa en la demanda bioquímica de oxígeno. Para determinar la presencia de materia orgánica se puede recurrir a la demanda biológica y química de oxígeno. Es útil cuando hay materia orgánica que puede consumir oxígeno para degradarse y formar otros productos. Sirve para analizar agua de ríos, lagos, etcétera, pero no sirve para revisar el agua potable porque en ésta las cantidades de materia orgánica son tan pequeñas que el método de medida del contenido de oxígeno molecular (O_2) se vuelve impreciso.

La base para entender qué es el parámetro llamado pH son los conceptos de potencial químico y de actividad ⁽⁸⁾.

El potencial químico es fácil de entender si hacemos una analogía con la temperatura de dos cuerpos distintos que numeramos como cuerpo 1 y cuerpo 2. Si T_1 y T_2 son las temperaturas respectivas, sabemos que si no hay intervención externa, el cuerpo fluye del cuerpo 1 al cuerpo 2 al poner en contacto cuando T_1 es mayor que T_2 .

Así mismo, si tengo dos fluidos separados por una pared permeable al NaCl, ésta pasará de la región con mayor concentración de sal a la que tiene menor concentración. Para esta clase de fenómenos se introduce el concepto de potencial químico y se denota con la letra m . Así se dice que la sal pasa de la región 1 a la región dos si m_1 es mayor que m_2 .

Una sustancia tendrá un potencial químico m_p si se encuentra en estado puro y cambiará a un potencial m_m cuando está en una mezcla. Su actividad cuando forma parte de la mezcla se calcula con una expresión algebraica en la que se restan los dos potenciales químicos

$$a = e^{\frac{\mu_m - \mu_p}{kT}}$$

De la expresión algebraica se ve claro que la actividad a no tiene unidades y también resulta que si el valor del potencial químico de la sustancia no cambia cuando pasa de su estado puro a formar parte de una mezcla, entonces $a=1$.

Una vez que se dispone de la actividad, se define el parámetro pH como sigue

$$pH = -\log_{10}(a)$$

El pH se mide en la escala de 1 a 14, pero corresponde a rangos de la actividad que van desde $a=0.1$ para $pH=1$ hasta $a=10^{-14}$ para $pH=14$.

El parámetro pH es una forma sencilla para caracterizar el grado de acidez de las sustancias. Los ácidos producen iones de hidrógeno en las soluciones, mientras que las bases producen iones hidróxido en la solución. La forma más simple de entender la neutralización es la teoría de Arrhenius, de acuerdo a la cual ésta se presenta cuando los iones de hidrógeno se unen a los OH para producir agua. Modernamente se sabe que esta propuesta tiene variantes más complicadas, pero para los fines de este trabajo es suficiente.

La actividad, a , del hidrógeno, es aproximadamente igual a la concentración de iones de hidrógeno C_{pH} , por eso hay definiciones que modifican ligeramente la definición anterior y cambian a por C_{pH} .

El pH del agua es una medida del equilibrio ácido-base y en los cuerpos de agua se alcanza o se rompe debido a la proporción de dióxido de carbono, bicarbonatos y carbonatos presentes en el fluido. Si crece la cantidad de dióxido de carbono disminuye el parámetro pH, y viceversa ⁽⁹⁾.

El pH en el agua es importante para medir la capacidad corrosiva de ésta, pero además, es importante para la salud humana porque puede interferir con los procesos de potabilización. En el estómago hay ácido clorhídrico, lo cual hace que el pH en su interior promedie 2.0 oscilando entre 1.0 y 3.5. Además, hay alimentos con pH muy bajo, como el jugo de limón, que tiene 2.4 y el vinagre, con 2.8. La recomendación para el agua de consumo humano tenga es que su pH sea inferior a 8.0.

La Agencia para Protección del Ambiente de los Estados Unidos (EPA por su nombre en Inglés) cataloga el pH como un parámetro secundario y recomienda que para consumo humano esté entre 6.5 y 8.5. A su vez, la Organización Mundial de la Salud coloca este intervalo entre 6.5 y 9.5 ⁽⁹⁾. Se le llama secundario porque, en lugar de una regla obligatoria y precisa, se establece una recomendación que tiene que ver con el sabor, el color y el olor. En cambio, cuando se trata de las técnicas de potabilización, el pH juega un papel fundamental, ya que el proceso de cloración que suele ser utilizado pierde eficiencia conforme crece este parámetro.

Agua para consumo humano

Las características del agua apta para consumo humano se presentan en la siguiente tabla, aunque cabe aclarar que los valores máximos recomendables varían de un país a otro y son revisados en el tiempo con el propósito de introducir mejoras.

Parámetros	Valor recomendado	Valor máximo admisible
pH	6.5 a 8.5	8.5
Conductividad	400 microsiemens/cm	500 microsiemens/cm
Sulfatos	25 Miligramos/litro	250 Miligramos/litro
Nitratos	25 Miligramos/litro	50 Miligramos/litro
Cloruros	25 Miligramos/litro	250 Miligramos/litro
Sólidos totales disueltos	---	1 000

Tabla IV. Valores recomendados y valores máximos permitidos para el agua dedicada a consumo humano.

Oferta de equipo en el mercado

Existen en el mercado medidores de pH, de conductividad, de turbiedad del agua, medidores de trazas de sustancias (o sea pequeñas cantidades), etcétera.

A continuación se muestran algunos ejemplos de los precios de los equipos⁽¹⁰⁾⁻⁽¹⁴⁾:

Tipo de equipo	Rango de precios en dólares estadounidenses
Espectrofotómetro detector en rango de rayos ultravioletas: "High quality uv vis spectrophotometer"	\$1 000 a \$6 000
Equipo de análisis basado en rayos X: "Mini X-ray analysis equipment"	\$60,000 a \$80,000
Equipo medidor de sustancias diluidas en agua en pequeñas cantidades: "Trace Moisture" típico	\$1,199 a \$2,177
Medidor de sólidos suspendidos y de turbiedad	\$2,499 a \$2,899
Medidor portátil de oxígeno disuelto	\$269 a \$359
Medidor portátil de conductividad	\$35 a \$65

Tabla V. Precios de los equipos utilizados para el análisis de agua tomados de diferentes tiendas de equipo de medición y ciencia en línea.

El estudio de factibilidad que vamos a explorar es necesario porque las técnicas de espectrofotometría estándar en laboratorios de investigación, o en empresas certificadas para ofrecer el servicio de análisis es extremadamente caro.

Por ejemplo, el espectrofotómetro LAMBDA™ 465 UV/Vis facilita un procedimiento de adquisición rápida de intensidades de absorción y de frecuencias de una muestra determinada. Enseguida, un software diseñado especialmente para este instrumento, llamado UV Lab™ Software, compara los resultados obtenidos con una base de datos que tiene disponible y ofrece opciones para identificar las sustancias de las muestras. El método se simplifica mucho pero incrementa los costos debido a los precios de la instrumentación y del software, que tienen mucho valor agregado.

Una vez concluido este trabajo de tesis, en el proceso de revisión del mismo se nos hicieron llegar varias referencias que agradecemos y que demuestran la fortaleza del enfoque que será expuesto a partir del próximo capítulo. Enseguida agregamos un resumen breve de ellas:

5. Chee-Loon et. al. han desarrollado un sistema compacto y portátil de instrumentos de análisis de propiedades ópticas que utiliza fluorescencia, absorbancia y dispersión de luz para identificar contaminantes en cuerpos de agua. Incluye los instrumentos ópticos y los colectores de datos in situ. Está construido dentro de un tanque similar a los usados para proveer de oxígeno a los hospitales y aislado de manera tal que puede ser sumergido. Incluye un rango muy amplio de frecuencias detectables ⁽¹⁵⁾.
6. S. Schaefer presentó en 2012 una tesis de maestría en la que reporta el desarrollo de sensores portátiles, de bajo costo, fáciles de usar y precisos. Utiliza la luz emitida por una clase específica de teléfono celular, para someterla a un sistema de espejos que la desvía para hacerla pasar por una muestra de agua y regresarla enseguida a la abertura donde está la cámara del teléfono. Con un software incluido, permite medir el grado de alcalinidad del agua apareciendo el resultado en la misma pantalla del aparato. El dispositivo se tiene que ajustar al tamaño del teléfono y tiene la desventaja de que requiere adaptaciones en la construcción para poderlo usar en otro de modelo y marca distinta ⁽¹⁶⁾.
7. ZHANG et. al. desarrollaron un analizador portátil de agua basados en un espectrofotómetro que maneja seis luces de LED. Utiliza el mismo procedimiento que nosotros porque usa un fotodiodo para transformar la onda luminosa en una señal eléctrica. El conjunto de LEDs distintos le permite detectar picos de luz en las siguientes frecuencias: 420 nm, 455 nm, 515 nm, 560 nm, 605 nm and 630 nm ⁽¹⁷⁾.

Para la realización de este trabajo sólo tenemos a disposición un espectrofotómetro enfocado a fines puramente educativos, no ofrece precisión, ni listas de datos que se puedan estudiar mediante técnicas de eliminación de ruidos, pero es considerablemente más barato. Por esa razón se propone un sistema de detección de la contaminación en el agua que no sea oneroso para los pueblos de la rivera del río Sonora.

Observaciones

La población de la ribera del río Sonora que desee conocer los niveles de contaminación en sus fuentes de agua para superar su incertidumbre, o para argumentar en su defensa lo que consideren pertinente, tiene hasta ahora tres opciones:

1. Pagar por un estudio profesional una sola vez, pero como lo más probable es que se necesiten análisis periódicamente, seguirán sin elementos suficientes cuando transcurra un tiempo largo debido a los fenómenos meteorológicos más comunes en la zona.
2. Establecer su propio laboratorio para estudios permanentes del agua. Existe un problema de costos y de capacitación de personal, así como de instalaciones.
3. Acudir a laboratorios de investigación científica a solicitar ayuda. Lo más común es que estas instituciones no estén en condiciones de ofrecer ayuda porque en ellas hay personal que trabaja cumpliendo plazos especificados en los proyectos de investigación en que se encuentran.

La propuesta es construir sondas con led que nos servirán para medir diferencias en la absorción de agua en diversas longitudes de onda. Para este estudio debemos seleccionar una región en el entendido de que el procedimiento puede usarse después en otras.

En nuestras consideraciones está que el sulfato de cobre es uno de los principales contaminantes del agua del río Sonora. La molécula del sulfato de cobre tiene la siguiente fórmula química: CuSO_4 y sus átomos se acomodan de modo que los cuatro oxígenos se ligan al átomo de azufre. Dos de los oxígenos se ligan con enlaces dobles y los otros dos con enlace sencillo, de modo que el azufre actúa con seis valencias. El átomo de cobre aprovecha que hay dos oxígenos que tienen como sobrante uno de sus enlaces y se liga a alguno de ellos. Ver figura siguiente:

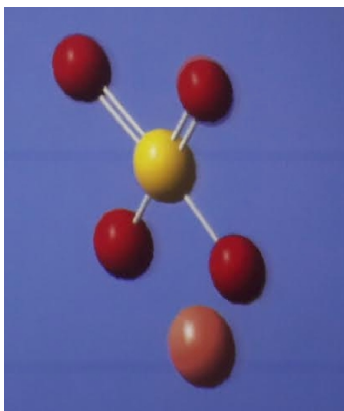


Figura 5

Un grupo de estudio de la física molecular y los átomos de muchos electrones ha calculado en la Universidad de Sonora las propiedades de esta molécula [10]. Su energía total es de -63 496.5 electronvolts y la distribución de sus orbitales se muestra en la siguiente imagen.

Ver figura

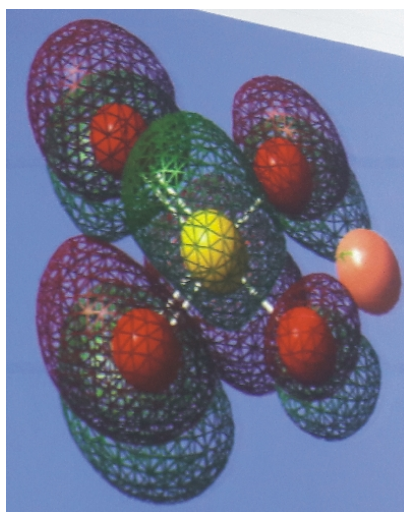


Figura 6

El dato más relevante de todos los proporcionados por el grupo de estudio es que la molécula del sulfato de cobre tiene un dipolo eléctrico de 14.5839 Debyes. Para dar una idea de su magnitud presentamos el dato de que una sola molécula de agua tiene dipolo eléctrico de 1.8546 Debyes.

Cada molécula de CuSO_4 hace interaccionar su dipolo contra el dipolo eléctrico de varias

moléculas de agua formando una mezcla que modifica su espectro de absorción electromagnética. Por si solo, el sulfato de cobre puede existir sin hidratar en forma de polvo blanco, pero en cuanto toma humedad del medio se transforma a un polvo de color azul. Enseguida explicaremos por qué ocurre esto.

En física molecular, la interacción de un dipolo contra otro da lugar a las fuerzas de van der Waals, que decaen con el inverso de la sexta potencia de la distancia. Debido a la gran magnitud de su dipolo, el sulfato de cobre logra atraer a un conjunto de moléculas de agua que caen en su esfera de influencia y vibran con una energía que resulta de la temperatura del material en polvo. Esas vibraciones se encuentran en el espectro infrarrojo cercano, en el rojo y en menor medida en el verde, dando por consecuencia que solamente queden sin ser absorbidas las ondas electromagnéticas del color azul. Cuando el CuSO_4 está disuelto en agua ocurre lo mismo.

Las vibraciones de los átomos de cobre, de oxígeno y de azufre tienen sus líneas de absorción en el infrarrojo lejano y cerca de la región de microondas, como resulta del estudio proporcionado por Francisco Adrian Duarte Alcaráz, el grupo de estudio. Los resultados más próximos al infrarrojo cercano se presentan enseguida:

Energía (1/cm)	Energía (eV)	Longitud de onda (nm)
1373.95	0.1703	7278
1706.93	0.2116	5858.3
1871.53	0.2320	5343

Tabla VI

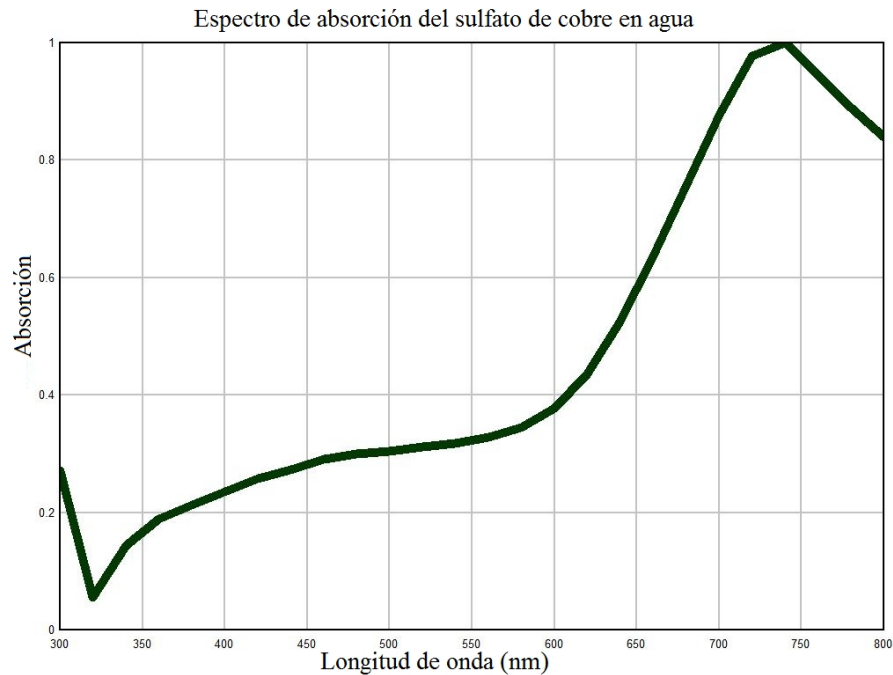


Figura 7 Espectro de absorción del Sulfato de cobre. La luz menos absorbida está en la región azul, por eso su color. La de mayor absorción está en el rojo e infrarrojo.

También tomamos en cuenta que los contaminante más típicos de las llamadas aguas duras son compuestos de calcio y de magnesio. De acuerdo a [CITAR A SMITH Y DRAKE] el calcio tiene tres líneas de emisión y absorción entre 800 y 900 nanómetros, lo cual lo coloca cerca de la banda de emisión del led infrarrojo que podemos obtener de manera comercial. Esas líneas se presentan en la tabla que sigue:

Absorción de luz por el CaCO ₃ (infrarrojo cercano)
849.802 nm
854.209 nm
866.214 nm

Tabla VII. Entre otras regiones, el carbonato de calcio absorbe en el infrarrojo cercano.

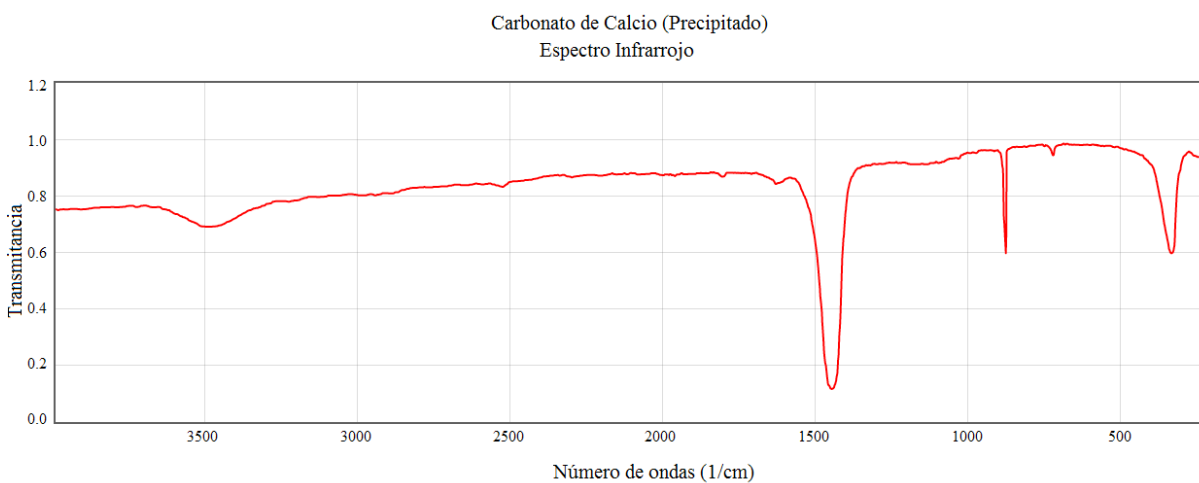
Además, el Carbonato de Calcio (CaCO_3) tiene tres picos importantes de absorción y de dispersión de luz en la zona del infrarrojo medio y del infrarrojo lejano. Éste se extiende desde los 2 500 nm, que son 2.5 micras de longitud de onda, hasta 50 000 nanómetros, que son 50 micras. Estos se presentan en la tabla que sigue:

Zona de absorción en 1/cm	Zona de absorción en nm	Zona de absorción en micras
1 445	6 920	6.92
1 375	7 272	7.272
335	29 850	29.85

Las conversiones fueron realizadas en línea en el sitio de Internet de la referencia ⁽¹⁸⁾.

Tabla VIII. Otras regiones de absorción del carbonato de calcio tienen sus máximos en las longitudes de onda indicada en esta tabla.

Se pueden obtener interpretando la siguiente gráfica como sigue. En ella tenemos el recíproco de la longitud de onda en la horizontal y transmitancia en la vertical. Los picos hacia abajo, más cercanos al cero, indican opacidad de la muestra, que puede deberse a que la luz es absorbida o a que es dispersada. En cualquiera de los dos casos, si se pudiera disponer de emisores led adecuados, el dispositivo que nos proponemos presentar en este trabajo podría registrar una caída de voltaje que constituye una marca identificadora del CaCO_3 .



Lamentablemente esta región no resulta útil, porque comparando con los dispositivos de led disponibles en el mercado local, sólo podemos trabajar en el infrarrojo cercano, de modo que nuestro enfoque queda limitado aquí por la oferta regional de insumos.

Otro compuesto que también está presente en las aguas duras es el carbonato de magnesio ($MgCO_3$) que es clasificado dentro de las partículas acuáticas que pueden absorber luz

Usando un espectrofotómetro Perkin Elmer, Lambda 18, es posible medir la capacidad de absorción (absorbancia) en longitudes de onda que van desde 200 hasta 850 nanómetros. La gráfica que sigue muestra longitud de onda medida en nanómetros en la horizontal y densidad óptica en la vertical. Se entiende por densidad óptica al logaritmo del cociente de la intensidad de luz transmitida a través del material entre la luz incidente. El resultado indica una capacidad de absorción pequeña del carbonato de magnesio pero una dispersión muy grande, lo cual también incide en la detección de la sonda que proponemos en este trabajo, por lo tanto, es detectable por el diseño que explicaremos más adelante.

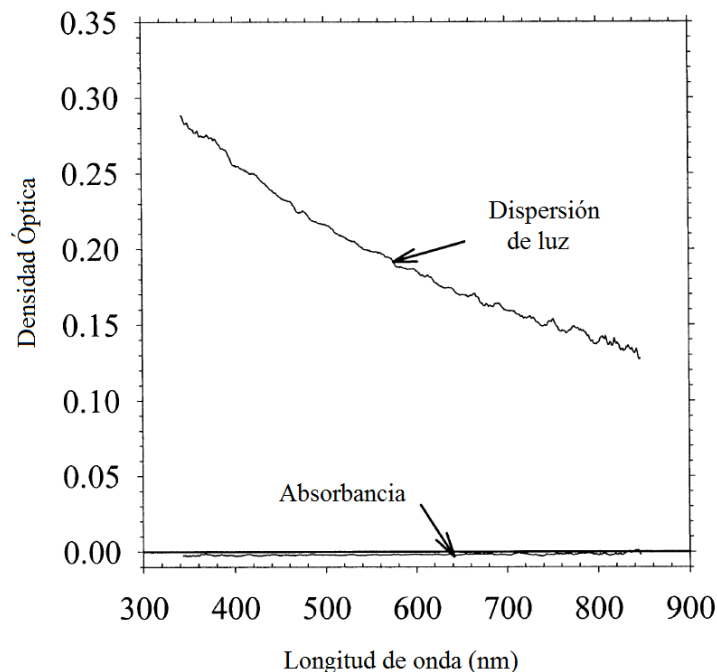


Figura 9. La absorción del carbonato de magnesio.

En el caso de la absorción del carbonato de magnesio, se puede apreciar que esta es pequeña, pero su dispersión de luz es grande para longitudes de onda al rededor de los 900 nm. Al rededor de ésta, la dispersión causada por sus partículas diluidas en el agua puede disminuir la intensidad de la luz.

Hay dos curvas claras en la figura, una demasiado cerca del cero, que corresponde a la absorbancia de la luz por parte del carbonato de magnesio y otra, más alta, debido a la luz dispersada. Significa que la luz que toca las partículas de este compuesto casi no se absorbe pero si se dispersa de manera considerable. Puede verse en el lado derecho de la figura que en la región infrarroja aún hay dispersión, de modo que un dispositivo basado en led infrarrojo puede ser de utilidad.

En consecuencia, nos proponemos diseñar una sonda basada en un led infrarrojo, que permitirá detectar contaminación por sulfato de cobre, o por elementos típicos del agua dura, como es el caso del carbonato de calcio.

El mismo planteamiento que haremos aquí puede ser desarrollado para estudiar absorción o dispersión de luz en regiones de los colores: ultravioleta, azul, verde, naranja, rojo. Tendría la ventaja de proporcionar cuatro puntos del espectro para discriminar entre contaminantes por sulfato de cobre o por componentes presentes en el agua dura. La desventaja obvia es que multiplica por cuatro el precio de los dispositivos. El caso del ultravioleta es algo más complicado, ya que los receptores en esa región del espectro no son del mismo costo que un simple fototransistor. Estos son considerablemente más caros, costando más de una decena de dólares en los casos mas baratos. Ver referencias ⁽¹⁹⁾⁻⁽²⁴⁾.

Capítulo 3

Análisis de las muestras de agua del Río Sonora

Después de considerar las opciones anteriores se determina que la forma de ayudar es estudiar la factibilidad de construir sondas de análisis de la contaminación del agua que sean baratas para la población.

El enfoque que se consideró más apropiado es el uso de la espectroscopía. Los fundamentos científicos se exponen enseguida. La idea es construir un dispositivo que emite y absorbe luz en una región del espectro electromagnético. Una vez comprobado el funcionamiento de la sonda en un rango de longitudes de onda de la luz, la misma idea se puede aplicar a otro sector de frecuencias, siempre y cuando existan en el mercado las fuentes luminosas baratas que se necesitan.

Hay dos posibilidades:

1. Usar el espectro de luz LED disponible en el mercado local.
2. Comprar una fuente de luz de uso estándar en los laboratorios científicos y usar filtros para seleccionar un intervalo.

Más adelante se explica por qué se escogieron luces de LED infrarrojos para diseñar una sonda en la que la onda electromagnética es emitida para que viaje a través de una solución acuosa y sea absorbida enseguida. El diseño lleva un circuito electrónico que traduce la intensidad de la luz infrarroja a lectura de un voltaje que es medido mediante un multímetro de uso comercial. Éste fue probado en agua extraída de la llave, agua purificada proveniente de un garrafón, agua con sulfato de cobre diluido a 1%, 3% y 5% y también en agua recogida del río Sonora y de la presa Rodolfo Félix Valdéz en octubre de 2014. Después se usó en muestras de agua traídas de Arizona.

Teoría física de la absorción de luz con enfoque en longitudes de onda infrarrojas

En esta sección se presenta la teoría⁽²⁵⁾ que respalda el uso de la espectroscopía para detectar contaminantes en agua.

Bases moleculares del proceso de absorción de luz

La absorción de luz en el medio acuoso que tiene que atravesar se rige por un conjunto de leyes básicas que describen las propiedades de las moléculas contenidas en el líquido. En el caso que estamos tratando, con las moléculas del agua y las de las sustancias que están diluídas en ella. Por sencillez, pondremos el ejemplo de una molécula diatómica. Ésta podría ser NaCl, o sal de mesa. Para describirla se usa la mecánica cuántica debido a que las energías involucradas son muy pequeñas y se encuentran en un rango de valores donde la mecánica clásica ya no es aplicable. En el fenómeno cuántico las energías toman valores discretos, es decir, no son un continuo como en la física de los fenómenos macroscópicos. Estos conjuntos de valores discretos se llaman valores de energía y son clasificados en tres grupos:

- Los niveles de energía rotacionales, que se deben a los movimientos de rotación de la molécula.
- Los niveles de energía vibracionales, que como en el ejemplo del NaCl, se originan en el acercamiento y alejamiento de los átomos respecto a su centro de masa.
- Los niveles de energía electrónicos, que en el caso del NaCl tienen que ver con el acomodo de 28 electrones que posee el compuesto. En este caso, los más relevantes para la interacción con la luz visible son los electrones que están más alejados del núcleo porque los más cercanos a éstos tienen energías de amarre tan negativas que sólo pueden ser removidos por los rayos X.

Dados los niveles de energía E_1 y E_2 , con $E_1 > E_2$, resulta que un electrón que se encuentra en la energía E_2 puede pasar a la energía E_1 solamente si recibe una energía $h\nu$ proveniente de un fotón que llega con la energía luminosa que incide sobre el átomo. La ecuación es

$$E_1 = E_2 + h\nu$$

Donde h es la constante de Planck y ν (Nu) es la frecuencia de la onda incidente.

Despejando resulta

$$\nu = (E_1 - E_2)/h$$

Entonces la energía absorbida corresponde justo a la luz cuya frecuencia coincide con ν o está muy cerca de ella.

El ejemplo de niveles de energía que intervienen en la absorción que nos interesa para este trabajo son los de la energía vibracional. Las razones las explicamos en seguida:

Los niveles de energía rotacional están tan próximos, que la diferencia $E_1 - E_2$ es muy pequeña. Al dividir entre la constante de Planck, las frecuencias que resultan se ubican en los 10^{10} hertz, que corresponde a las microondas.

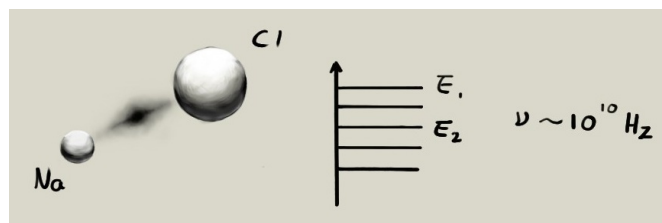


Figura 10. Niveles de energía rotacionales.
La frecuencia absorbida está en la zona de microondas.

Por el contrario, los niveles de energía electrónicos son los más separados. Esto da por consecuencia que $E_1 - E_2$ es mayor y al dividir entre la constante de Planck, resultan frecuencias en la parte más alta del visible y el ultravioleta. Con $\nu \sim 10^{14}$ o 10^{15} Hz.

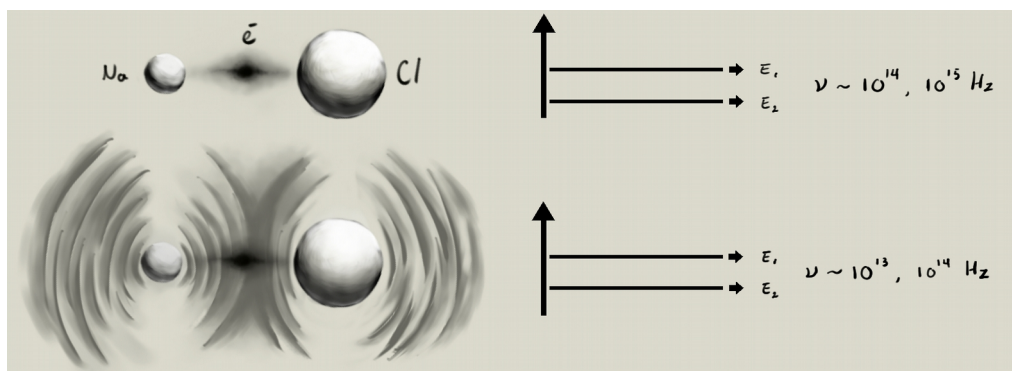


Figura 11. Dibujo inferior, los niveles de energía vibracionales.

Para los niveles de energía vibracionales, el espectro de absorción está en la región de infrarrojo.

Dibujos superior, los niveles electrónicos llevan a espectro de absorción en la luz visible y en ultravioleta.

Los valores intermedios de la diferencia entre $E_1 - E_2$ son los que se encuentran en los niveles de energía vibracional. Por eso las absorciones suelen ocurrir en el infrarrojo $\sim 10^{13}$ o 10^{14} Hz.

Parte de la energía luminosa que absorbe esa molécula se localiza también en la luz infrarroja. Más allá de los 800 nm de longitud de onda. Ésta región es la que vamos a buscar con el detector.

Ley de Beer-Lambert

El punto de partida para el estudio de la contaminación del agua es la ley de Beer-Lambert, que se expresa algebraicamente como sigue

$$I = I_0 \cdot 10^{-\epsilon(J)l}$$

donde I_0 es la intensidad de la luz entrante, I es la intensidad de la luz saliente, ϵ es un parámetro que recibe el nombre de absorptividad y l es la distancia que recorre la luz en el interior del agua que se desea medir.

El parámetro ϵ es característico de cada material, pero depende también de la frecuencia de la luz incidente. Por ejemplo, el agua pura, sin iones, no absorbe luz visible, ni infrarroja tampoco. En cambio, el agua contaminada con sulfato de cobre absorbe en varias frecuencias, revelando así la presencia de compuestos químicos distintos al agua.

Desarrollo matemático:

Si dividimos entre I_0 la expresión anterior resulta

$$I/I_0 = 10^{-[\epsilon]l}$$

Si en seguida tomamos el logaritmo base 10 de esta expresión, se obtiene

$$\log_{10}(I/I_0) = -[\epsilon]l$$

Usando las propiedades de los logaritmos escribimos

$$\log_{10}(I/I_0) = -\log_{10}(I_0/I)$$

Y sustituyendo la expresión anterior

$$-\log_{10}(I_n/I_0) = -[\epsilon]l$$

Multiplicando por -1 obtenemos

$$\log_{10}(I_n/I_0) = [\epsilon]l$$

Se define la absorbancia del material (agua para nuestro caso) como sigue

$$A = \log_{10}(I_n/I_0)$$

y entonces se reescribe la ley de Beer-Lambert en la forma que sigue

$$A = [\epsilon]l$$

En la parte de la respuesta lineal del diseño electrónico se cumple la relación general:

$$I_n = xV$$

Donde V es la lectura del voltaje en el dispositivo, x es una cantidad desconocida e I_n es la intensidad de la luz emitida.

Para la intensidad de radiación incidente fuera del medio se cumple que

$$I_{n_0} = xV_0$$

y para la intensidad de radiación cuando sí hay agua tenemos

$$I_n = xV$$

Dividiendo:

$$I_n/I_0 = xV_0/xV = V_0/V$$

Calculando el logaritmo base 10 tenemos que la absorbividad es

$$A = \log_{10} V_0/V$$

El caso del sulfato de cobre

En esta sección revisamos algunas propiedades del sulfato de cobre para explicar mediante un ejemplo la teoría expuesta previamente.

La razón para escoger esta sustancia es que es el compuesto químico contaminante que se derramó en mayor proporción en el río Sonora.

La fórmula química del sulfato de cobre es CuSO_4 . Macroscópicamente se ve como un cristal de color azul y forma polvo fino del mismo color.

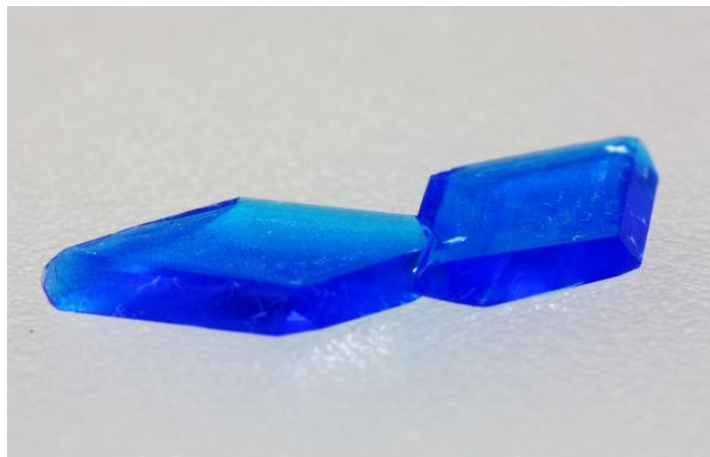


Figura 12. Cristales de sulfato de cobre.

Para comprender a qué se debe, consideramos la siguiente imagen para señalar colores y longitudes de onda en nanómetros, donde se ilustran los rangos de las diferentes longitudes de onda visibles por medio de una rueda de color.

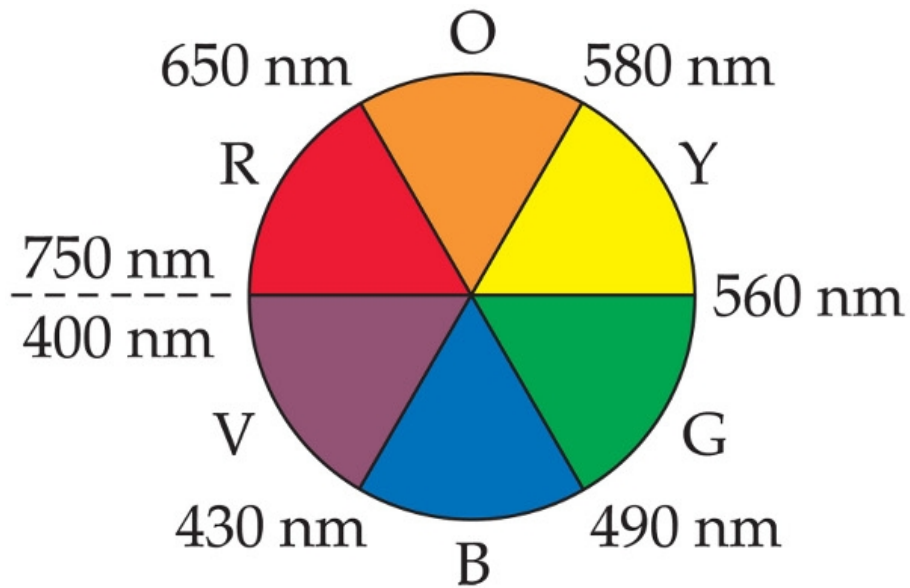


Figura 12. Rueda de colores.

y la siguiente tabla para explicar lo que ocurre:

Longitud de onda absorbida (nm)	Color absorbido	Color percibido porque es transmitido
400	Violeta	Azul-amarillo
450	Índigo	Amarillo
480	Azul	Anaranjado
490	Azul-verde	Rojo
530	Verde	Púrpura
570	Amarillo-verde	Azul oscuro
600	Anaranjado	Azul
650	Rojo	Verde

Tabla IX. Colores percibidos en los materiales debido a sus regiones de absorción.

En el caso del sulfato de cobre ocurre lo enunciado en el séptimo renglón. Los niveles de energía vibracionales absorben la energía de la luz anaranjada. Por esa razón alcanza nuestros ojos la luz azul.

Capítulo 4

Trabajo experimental y resultados

La detección de contaminantes en el agua puede ser abordada por medio de un instrumento llamado espectrofotómetro. Consiste en tomar luz de una lámpara y hacerla pasar a través de la muestra de agua que se desea analizar. Dependiendo de la calidad del aparato, es posible disponer de una gráfica que muestra máximos o mínimos muy agudos, los llamados picos de absorción de luz, en la pantalla de una computadora, tal que se puede medir la intensidad de la absorción mediante la profundidad de los picos que se presentan, además, se puede medir la localización de cada pico en una escala horizontal que muestra las longitudes de onda. En el caso de instrumentos de óptima calidad es factible disponer de una base de datos que sugiere al investigador cuál es el elemento químico, o compuesto, que estaría dando lugar al pico de absorción que se observa.

El problema con esa clase de instrumentos es que son extremadamente caros y sólo están disponibles en laboratorios de investigación especializados, de modo que su uso en trabajo de campo es imposible. Otra opción es recoger las muestras en los sitios que se desea estudiar, etiquetarlas adecuadamente y llevarlas a analizar en un laboratorio especializado. Esto involucra costos que hacen inaccesible el servicio para las personas de recursos escasos.

Entonces la propuesta para hacer este trabajo consistió en construir un aparato con las dos condiciones siguientes:

1. Debería ser portátil
2. Tendría que ser de bajo costo.

La segunda condición sería la más importante y es la que determina la viabilidad del proyecto. El riesgo sería la pérdida de versatilidad en la cantidad de contaminantes que se

pueden detectar. Se optó por ser específicos y revisar el caso concreto de las aguas duras y contaminada por sulfato de cobre, y de éste, su capacidad para absorber luz en la región infrarroja. Para ganar precisión se puede agregar variaciones del dispositivo que trabajen en otras regiones del espectro, pero eso multiplica los costos.

Caracterización de LEDs

Para determinar la viabilidad de un emisor, se hicieron pruebas para comprobar la longitud de onda del diodo emisor de luz porque son componentes baratos disponibles en el mercado. Para este propósito se utilizó un espectrofotómetro para fines didácticos de la marca Ocean Optics/Pasco facilitado por la Universidad de Sonora. Para el uso de éste, se tuvo que conseguir el software para la medición y despliegado de datos cuantitativos y cualitativos debido a que el software que se incluye en el paquete nunca funcionó.

El paquete incluye un espectrofotómetro del modelo Amadeus, una lámpara con diferentes longitudes de onda (UV, IR, Visible), fuente de alimentación para la lámpara, un cable de fibra óptica, un cable USB para transmisión de datos y alimentación de corriente directa para el espectrofotómetro y otros accesorios.



Figura 13. Espectroscopio de uso puramente didáctico. Usado para la caracterización de los LED disponibles en el mercado local.

La lámpara no fué necesaria para los propósitos de la caracterización de emisores de luz, por lo que se dejó de lado. Sin embargo la fibra óptica fué indispensable para los experimentos. El receptor de El método para caracterizar los LEDs fué un tanto sencillo: consistió en hacer un circuito simple para alimentar al LED con 5 Volts, protegiéndolo con una resistencia, el potenciómetro, de modo que se tuviera un brillo apropiado sin quemar el LED y tomar el extremo donde normalmente iría la lámpara del equipo y apuntarla directo al haz de luz del diodo.

Para ejemplificar, se presenta la siguiente imagen con un LED azul, aunque en la caracterización se hizo con uno infrarrojo y en oscuridad casi total para evitar señales no deseadas por cualquier rayo de luz que pudiese entrar en la fibra.

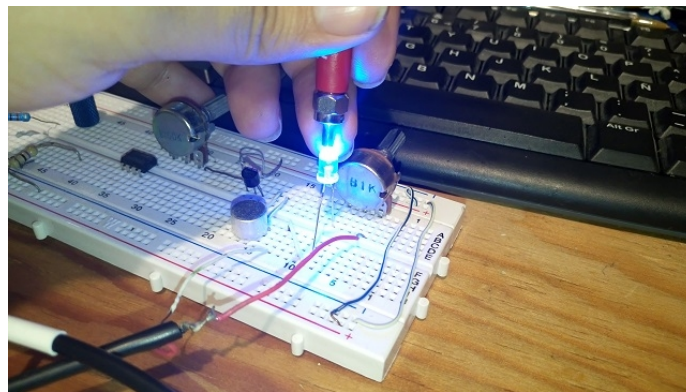


Figura 14. Técnica de caracterización de los LED.

En seguida se muestra la imagen de la respuesta del espectrofotómetro en el software diseñado para su uso en una laptop.

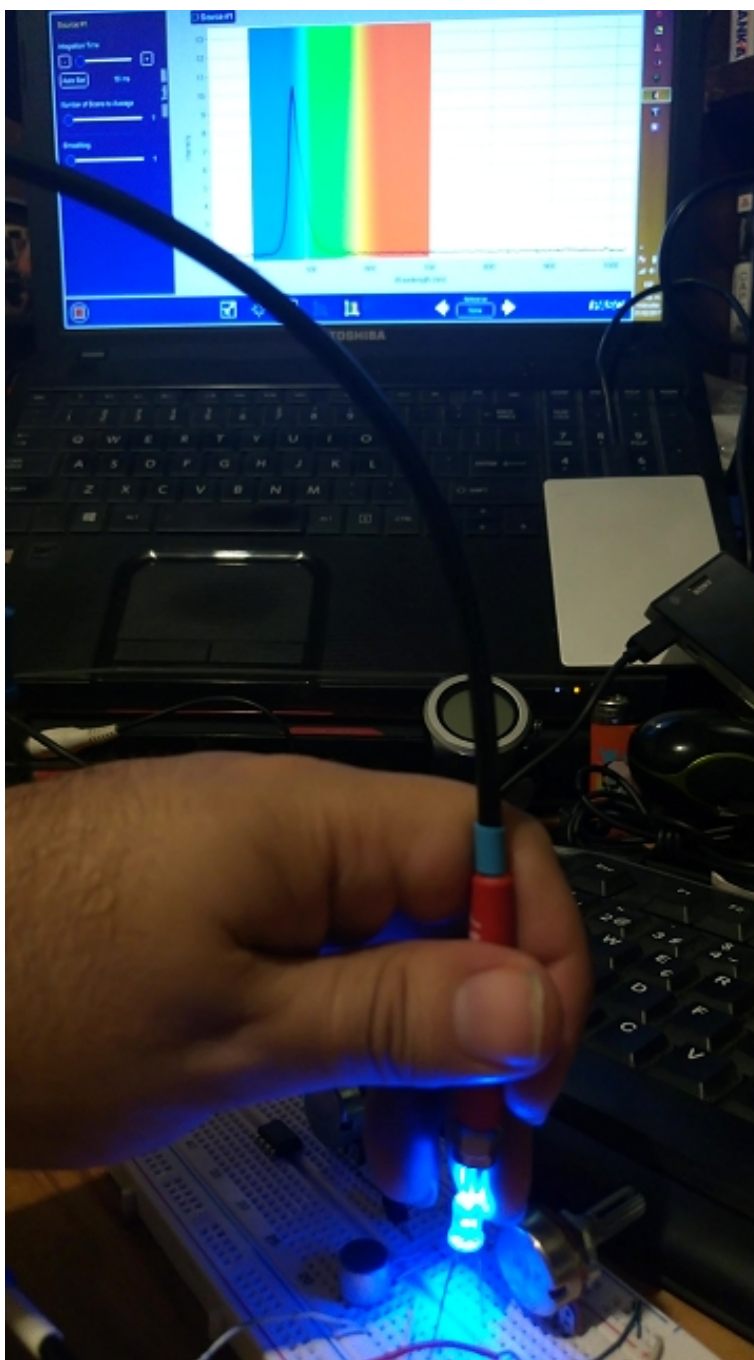


Figura 15. Prueba de caracterización de LED en curso.

Puede apreciarse que hay respuesta mayoritariamente en una variedad de azul claro, ligeramente cercano al verde, alrededor de los 465 nm.

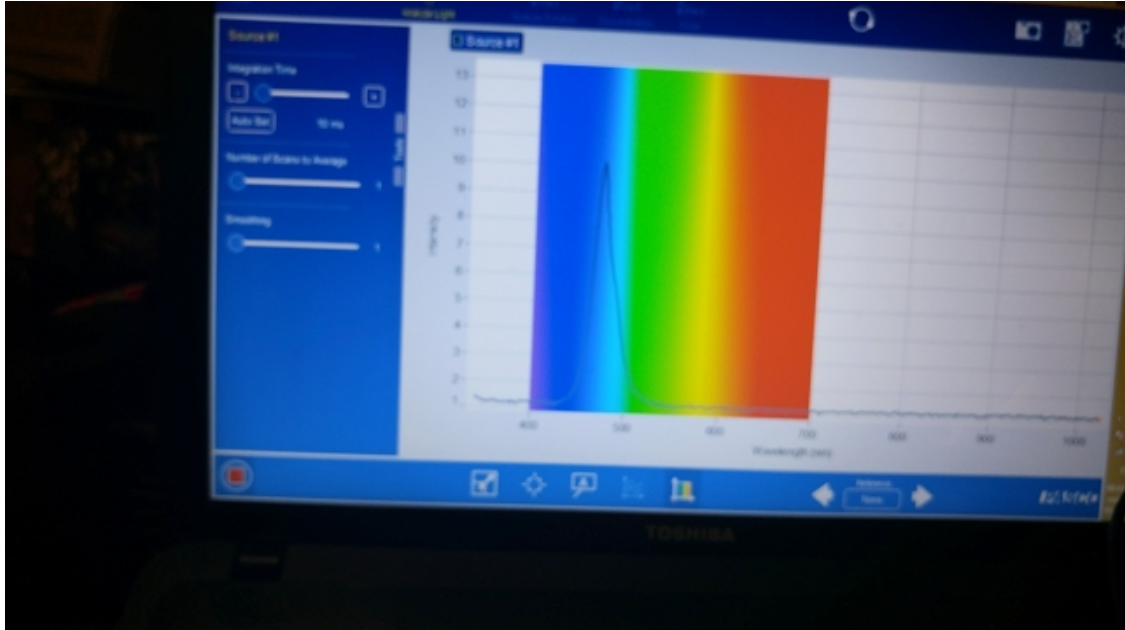


Figura 16. Pico de longitud de onda. Imagen proporcionada por el espectroscopio usando software gratuito adecuado para el caso.

Para cada uno obtuvimos una captura de pantalla, como se muestra en las siguientes figuras:

La figura 15 corresponde a la onda electromagnética emitida por el led ultravioleta. Puede apreciarse que existe una curva abajo a la izquierda, ubicada en la región marcada con color morado en la longitud de onda inferior a 450 nanómetros y poco mayor a 400 nanómetros.

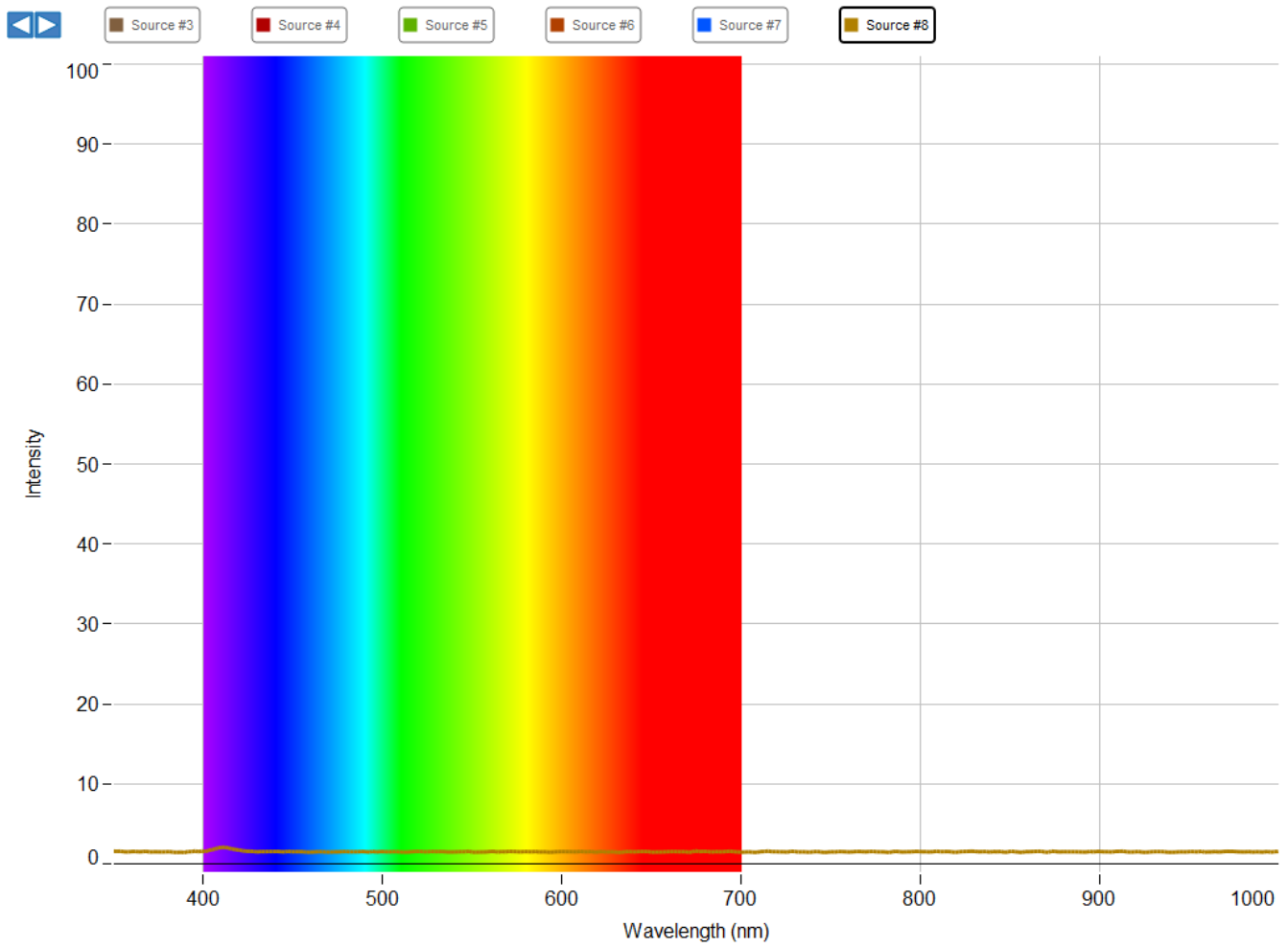


Figura 17. Primer led azul. Curva de respuesta poco después de los 400 nm.

Otro led de color azul produce la siguiente imagen.

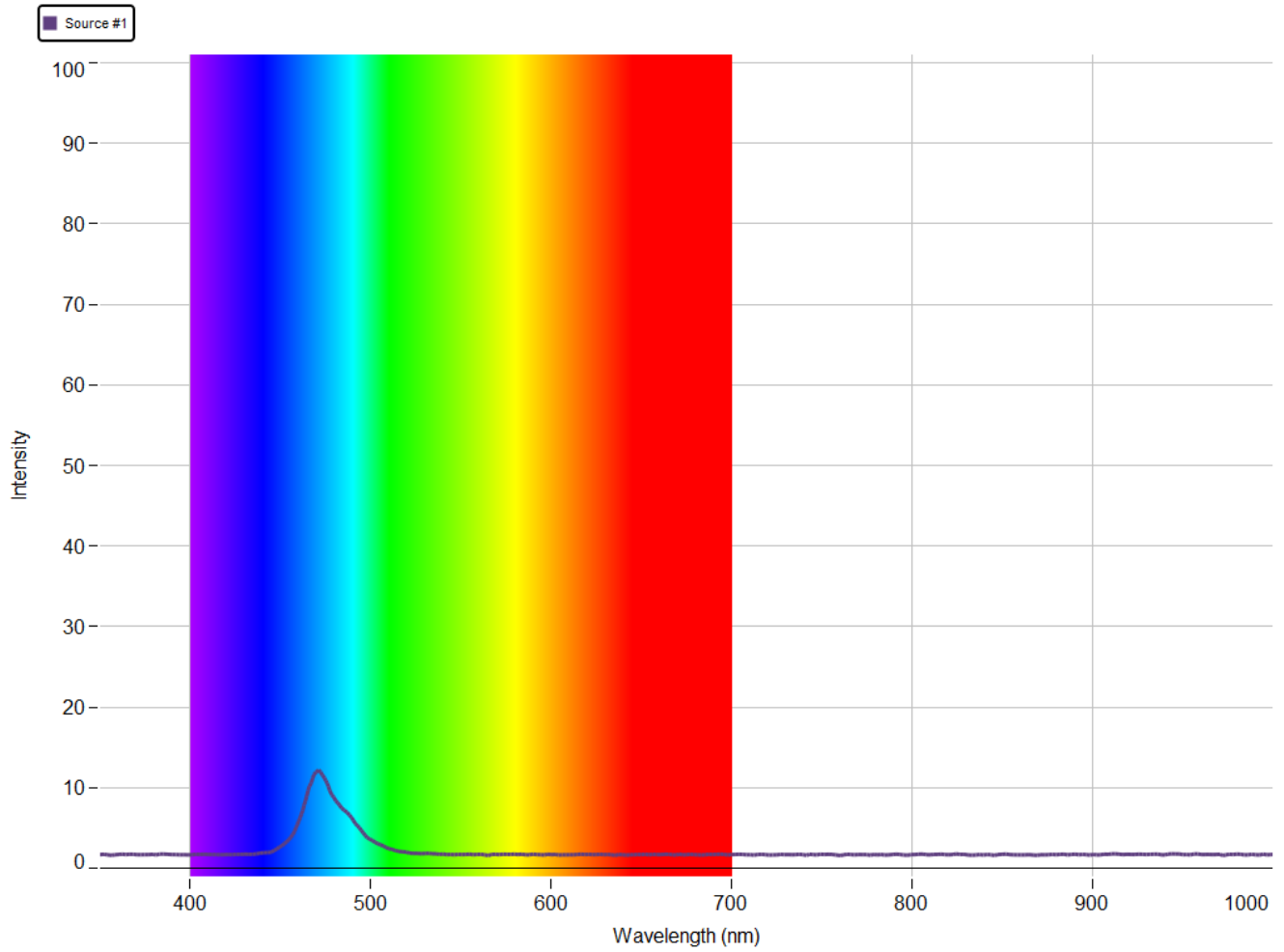


Figura 18. Segundo led azul.

Se aprecia una curva en la región azul, con un máximo situado entre 450 y 500 nanómetros.

El caso del led verde produce el resultado que se muestra en la figura que sigue:

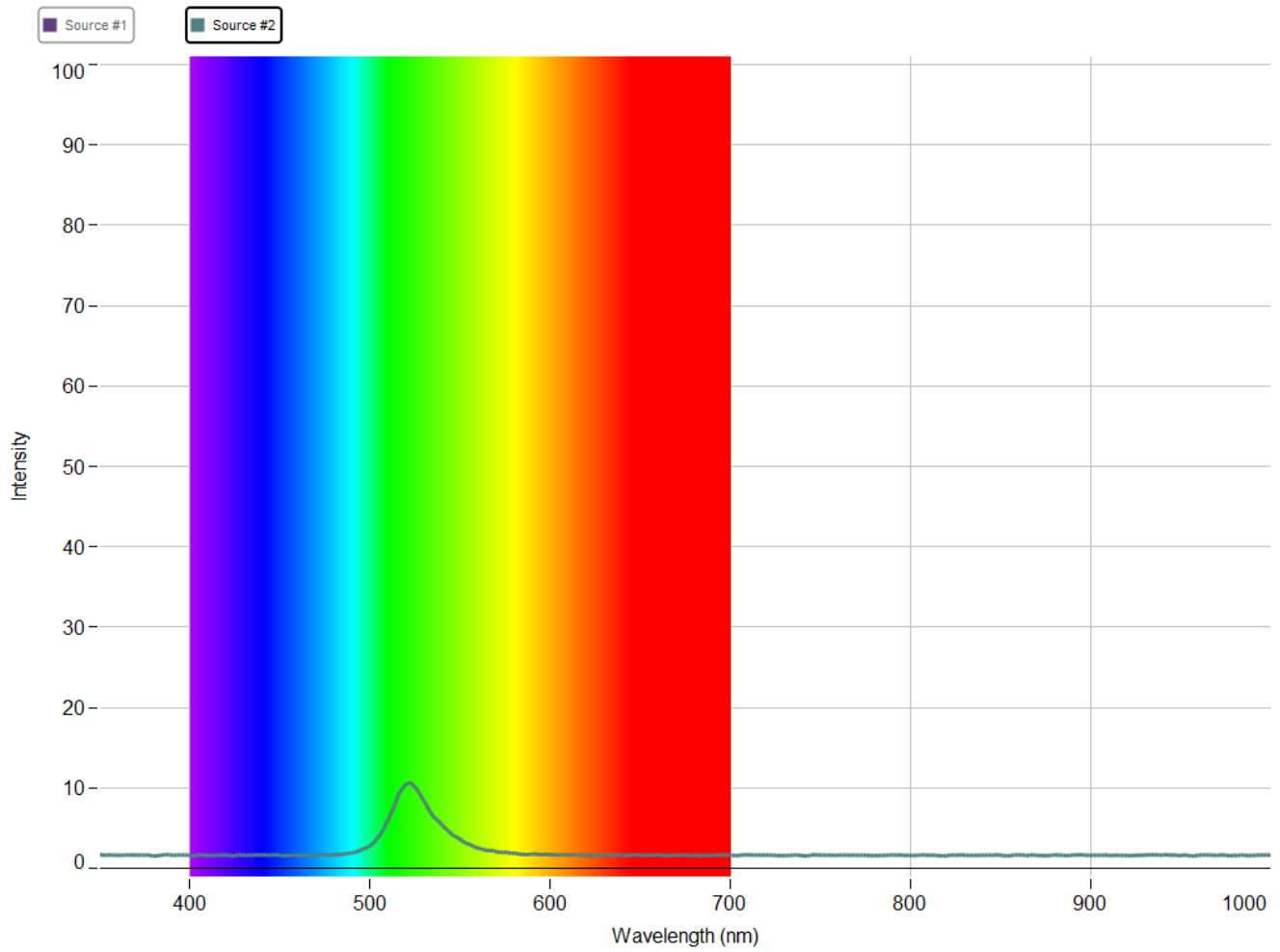


Figura 19. Curva de emisión en verde.

con la curva de emisión situada a la derecha de 500 nanómetros y antes de los 550 nanómetros.

El led naranja nos proporciona la siguiente figura:

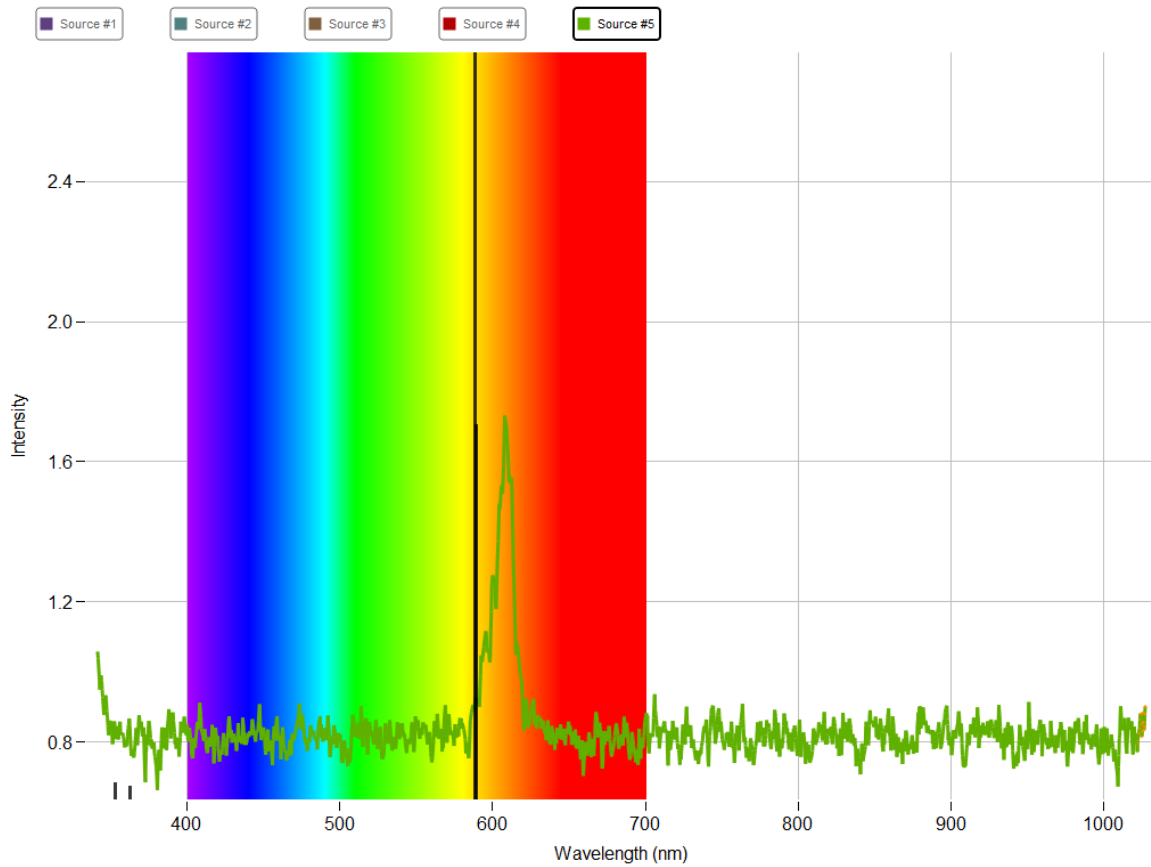


Figura 20. Curva en naranja. Nótese que el led emite más ruido.

La curva está situada a la izquierda de la región roja, con un máximo a la derecha de los 600 nanómetros.

El método con el infrarrojo fué exactamente igual.

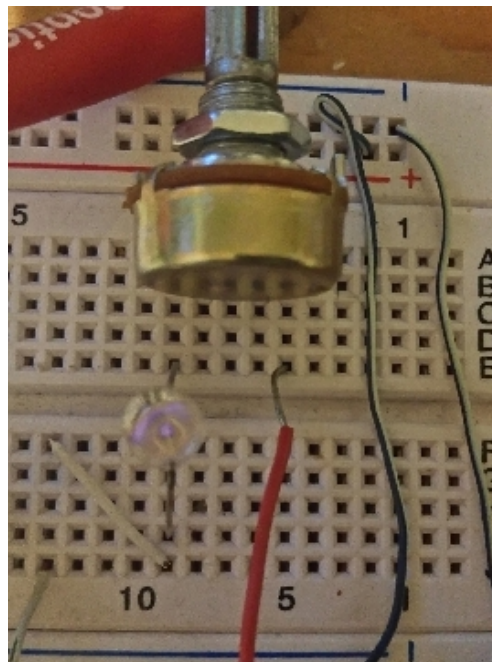


Figura 21. Led infrarrojo.

Se puede apreciar en el LED infrarrojo con un ligero tinte violeta, que es la forma en que las cámaras de teléfonos celulares representan la luz infrarroja.

.Abajo se muestra la manera de tomar la muestra de luz infrarroja, igual que en el caso anterior.

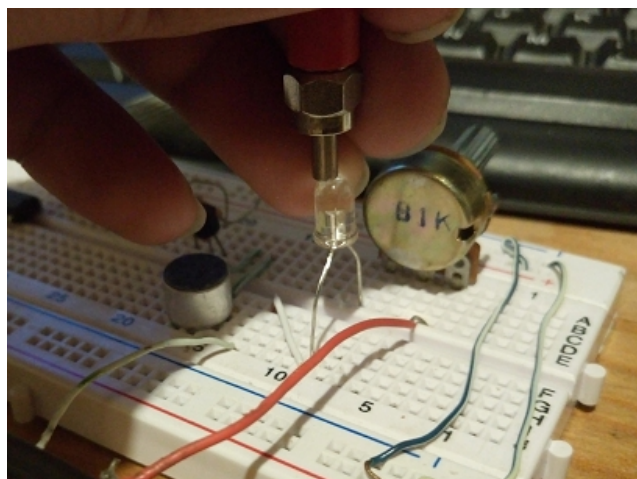


Figura 22. Caracterización del LED infrarrojo.

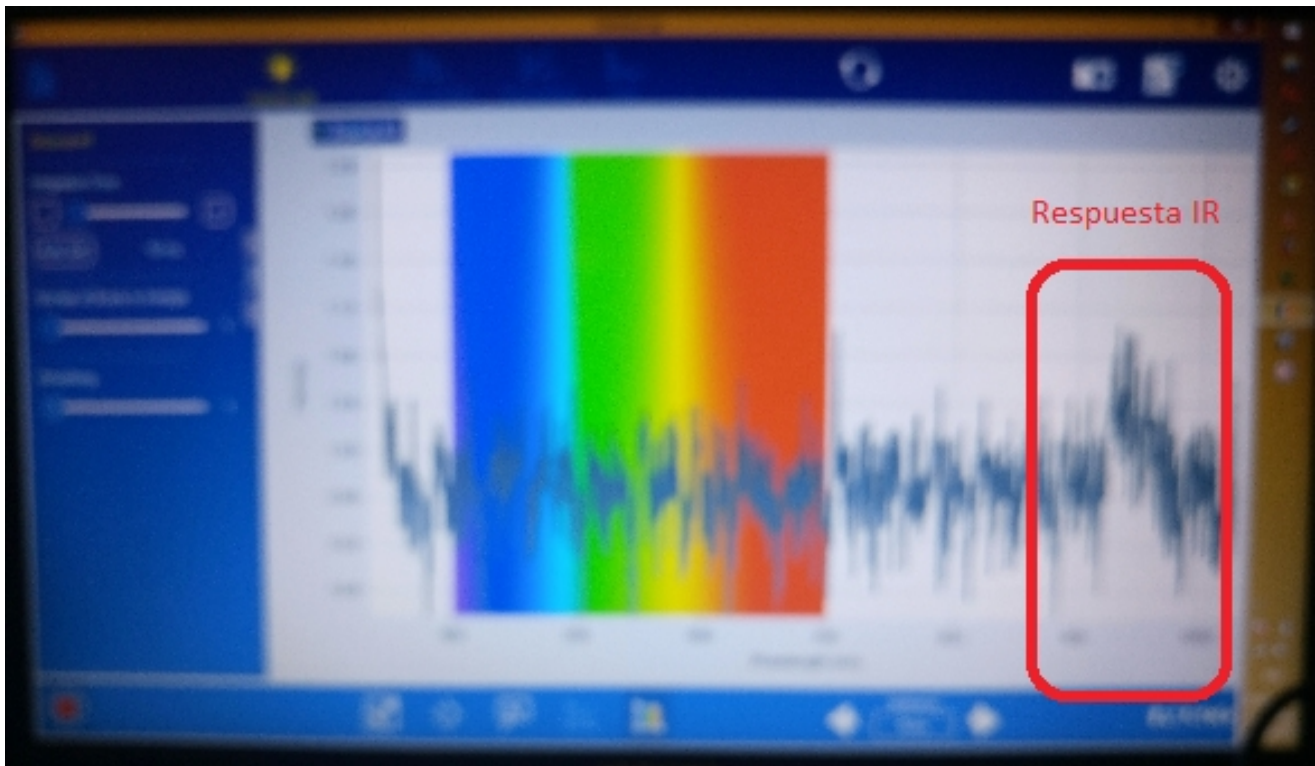
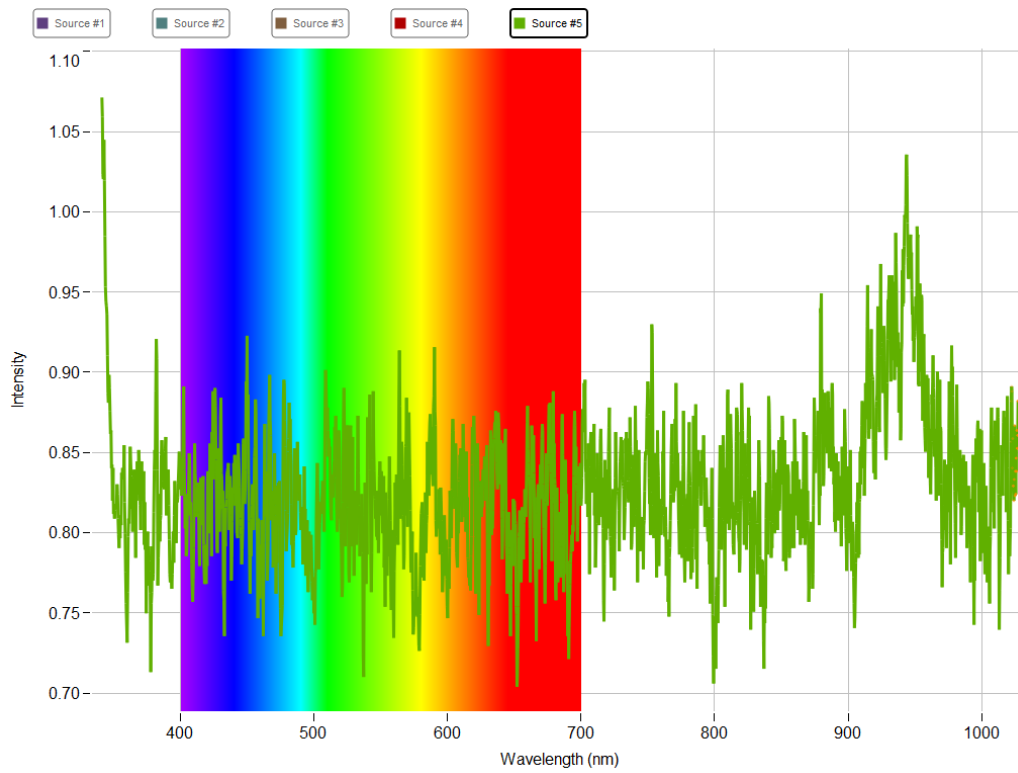


Figura 23. Primera respuesta en IR.

En la figura 21 se muestra la medición cualitativa del infrarrojo. La señal es muy pequeña y tiene mucho ruido, pero se puede apreciar que se encuentra aproximadamente por los 950 nm.

El led infrarrojo produce en el espectrofotómetro la figura que sigue:



Se aprecia que el ruido es muy considerable, pero el máximo está localizado cerca de los 950 nanómetros.

Proceso experimental

Como ya se expuso previamente, a falta de equipo disponible, se optó por crear una alternativa que pudiera ser accesible y confiable por el conocimiento de la física que se aplica en este caso.

El principio básico es que cuando se incrementa la concentración del contaminante crece también la cantidad de luz absorbida. Esto se traduce en una intensidad de luz transmitida.

Con un fotoreceptor se puede traducir a voltaje la intensidad de la luz recibida, por lo tanto, se armó un dispositivo con un emisor de luz infrarroja más un fotoreceptor conectado a un dispositivo electrónico a su vez conectado a un multímetro. Así la relación es la que sigue: agua más clara facilita mayor intensidad de luz que la atraviesa y eso resulta en una lectura más alta de voltaje. A la inversa, agua más contaminada significa menos luz que logra atravesar, dando lugar a una lectura de voltaje menor.

Este sistema es simple pero requiere calibrar el aparato para saber de qué porcentaje de contaminante se está hablando. Para este fin se procedió como sigue:

El aparato diseñado es capaz de analizar una muestra de agua medida por medio de un emisor de luz infrarroja y un receptor que funciona en ese mismo rango, utilizando para esto un fototransistor. El propósito es causar que se absorba luz infrarroja en la muestra dependiendo de la concentración de la solución en el agua. La absorción de luz por la muestra se aprecia gracias a la caída del voltaje en el receptor.

El experimento se realizó tomando diferentes muestras con concentraciones de 0% (agua limpia como control), 1%, 3% y 5%. Las muestras se obtuvieron con la colaboración de las estudiantes de la maestría en nanociencias: Karol Yesenia Hernández Giottonini y Marcia Pamela Ibarra Estrada.

El dispositivo cuenta con diferentes fases: La sonda, que es el emisor junto con el receptor, que constituyen un dispositivo portátil que puede ser introducido en líquidos.

La sonda está compuesta por una caja de plástico con dos probetas saliendo de ella. Una de éstas tiene un LED infrarrojo como emisor, y en la otra un fototransistor infrarrojo como receptor. Estos dos dependen de un circuito que se encarga de alimentar al LED y otro que alimenta al fototransistor, pero que a la mitad tiene una salida para conectar al receptor con la siguiente fase, que es para adquisición de datos.

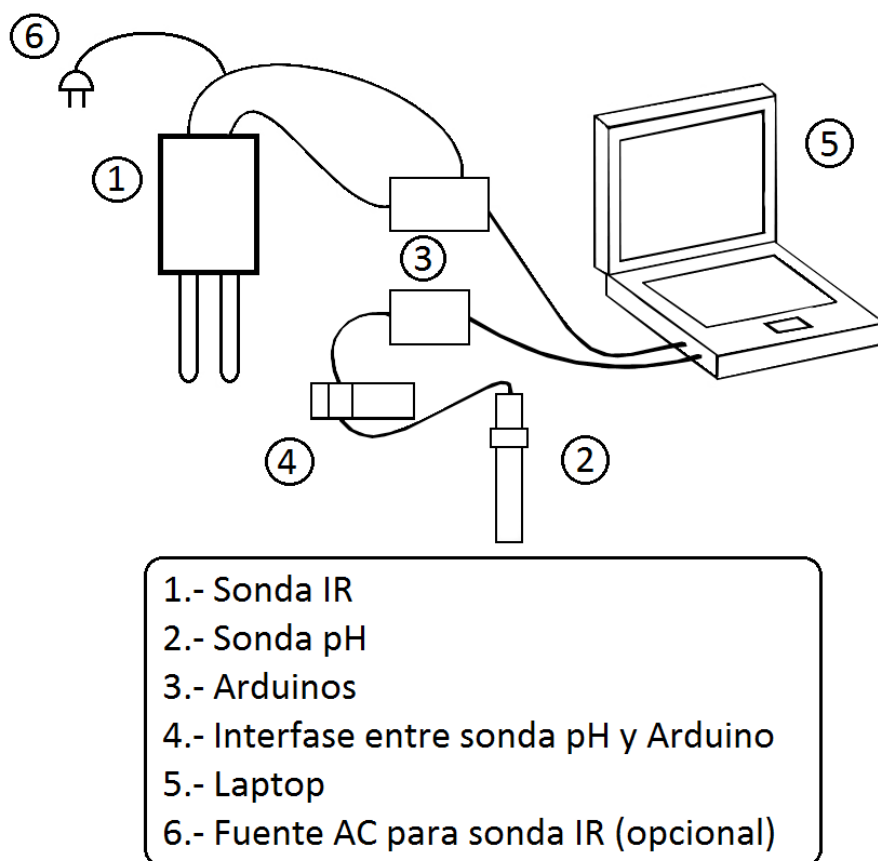


Figura 25. Esquema general del sistema.

La fase de adquisición de datos se constituye por una tarjeta Arduino con un programa cargado para recibir los datos en un puerto de entrada de una señal analógica. Esta tarjeta presenta la opción de alimentar a la sonda con 5 volts o utilizar una fuente de voltaje separada. El programa de Arduino simplemente toma los datos como niveles de voltaje, pasando esa información a la siguiente fase.

La fase siguiente es una computadora portátil que utiliza LabView con un programa para recibir los datos e interpretarlos en una gráfica en 2D. En el eje X se representa el tiempo, mientras que en el Y se representan los niveles de voltaje que fueron tomados del fototransistor por el Arduino. Este se graba en archivos de texto creados por el LabView para su posterior análisis. Aparte del almacenaje de los datos, el programa muestra los datos en pantalla, permitiendo a la persona llevar un registro visual del tiempo transcurrido y el cambio en la absorción de la muestra.

Los datos se grafican utilizando Mathematica para mostrar una gráfica que representa la señal en el tiempo y se puede exportar para su análisis en otros paquetes de cálculo si se llegase a requerir.

La ventaja de este sistema es que es comparativamente más accesible para su construcción y uso que un espectrofotómetro de laboratorio. Puede ser también portátil, pudiendo emplearse en mediciones de campo o incluso estacionario, para utilizarse en una estación de monitoreo.

Se puede adaptar para medir concentración de otras sustancias, construyendo módulos adicionales que midan en diferentes longitudes de onda.

Ruido:

El ruido es una característica de la señal que no se puede evitar y que es causado por diferentes fuentes. La luz ambiental, señales electromagnéticas típicas de una ciudad o de dispositivos electrónicos cercanos, al igual que un ruido propio del dispositivo que se utiliza como tarjeta de adquisición de datos, que toma la señal analógica y la convierte en digital.

Descripción de los dos sistemas:

En esta sección se presentan los elementos que integran el equipo para la toma de datos de las muestras. Los dos métodos para obtener datos siguen exactamente el mismo procedimiento para el proceso de obtención de una señal: conversión a niveles de voltaje, adquisición, muestreo y procesamiento. Esto se logra utilizando sondas de tipo óptico y resistivo.

La sonda de tipo óptico se compone por un emisor de luz infrarroja, un LED y un fototransistor que trabaja en la sección del infrarrojo cercano. Estos dos componentes se unen en un circuito que los alimenta con 5 volts y en el caso del emisor, incluye un resistor para proteger al diodo emisor de luz. En el caso del receptor, antes de cerrar el circuito, este tiene una salida para mandar una señal que muestra el comportamiento del receptor por medio de un nivel cambiante de voltaje. Si se desea monitorear otra región del espectro electromagnético se necesita un dispositivo similar, pero que emita y reciba en el intervalo de longitud de onda relacionado.

Antes de diseñar la sonda, se hizo una prueba de concepto que consistió en utilizar un multímetro para medir los cambios de voltaje en el circuito. Éstos probaron ser medibles, pero la resolución del multímetro era demasiado baja como para apreciar fielmente los cambios. Ésto sirvió, sin embargo, como punto de partida para el diseño del sistema que se utiliza.

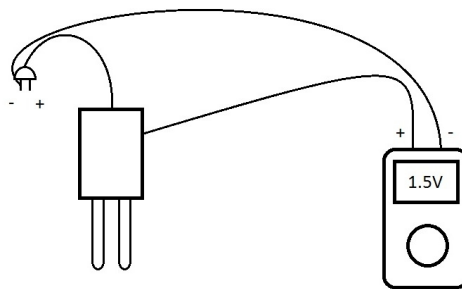


Figura 26. Esquema de pruebas iniciales. Sonda y multímetro.

Esta primera sonda prototipo está contenida en una caja gris de plástico con dos tubos de ensayo para sumergir al emisor y al receptor en las muestras a analizar. El circuito en el interior está en una placa fenólica que tiene dos entradas eléctricas, + y –, y un cable de salida para la señal, que va a la tarjeta de adquisición de datos.

El diseño de este dispositivo se basó en la ley de absorción de Beer-Lambert para su funcionamiento.



Figura 27. Primer prototipo infrarrojo.

En el caso del medidor de PH, éste se compone de una resistencia que varía en su valor, dependiendo de las propiedades eléctricas de la muestra con la que se encuentra en contacto. De este modo se calibra con diferentes muestras de referencia que marcan alcalinidad, acidez o neutralidad. Esta sonda se compró ya hecha, producida por Atlas Scientific. Es cilíndrica, tiene dos entradas eléctricas y una salida para los datos.

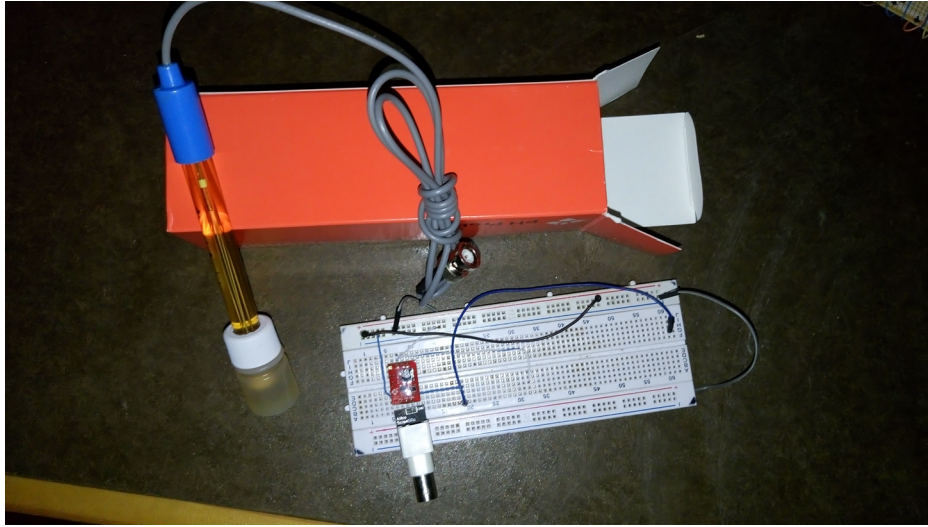


Figura 28. Sensor comercial de pH.

Se sumerge parte de la punta, mientras que el cable se conecta a un circuito de interfase con la tarjeta de adquisición de datos.

Ambas sondas, a pesar de sus diferentes funcionamientos, proporcionan el mismo tipo de señal de salida, que es un nivel variable de voltaje. Esto facilita la recepción de la información de los datos y su interpretación por una tarjeta Arduino que se encarga de recibirlos y pasarlos a valores numéricos por medio de entradas analógicas de voltaje. Esto se hace con un programa que recibe las señales de las dos sondas, mientras pasa el tiempo las procesa del mismo modo que lo hace un multímetro, asignando un valor en una escala previamente definida en un proceso de muestreo. Una vez que se tiene ésto, la señal se ha convertido de analógica a digital, siendo enviada por conexión USB a una computadora para que se interprete y se despliegue. Las tarjetas Arduino utilizadas fueron los modelos Arduino Mega y Arduino UNO.

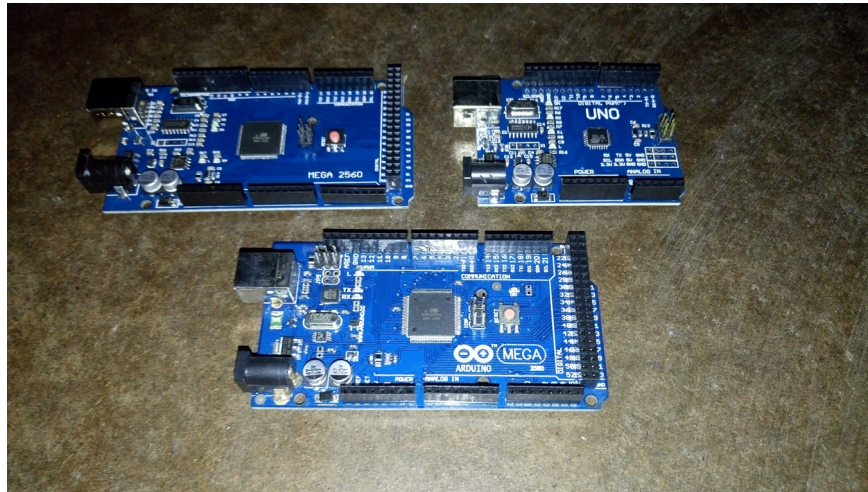


Figura 29. Arduinos UNO y MEGA utilizados en los experimentos.

La siguiente fase se conforma por una computadora que corre el programa LabView de National Instruments. Este a su vez corre un programa hecho para que se analicen los datos de entrada en ciclos, asignándolos al eje Y, mientras que el programa, en su propio conteo, asigna los datos del eje X. Cada dato se procesa de forma independiente al anterior y se cicla para procesar el siguiente, hasta que el usuario decida detener la secuencia. A modo de salida, hay dos formas de procesar estos datos: la primera consiste en desplegar los datos en una gráfica que se muestra en la pantalla, mientras que la segunda consiste en almacenar todos los datos del muestreo en archivos de texto para su posterior procesamiento.

Medidas	15.4x1x1cm (sonda) 128cm (total)
Peso	52g
Interfase para la sonda PH	100g

Tabla X. Datos de la sonda pH y de la interfase diseñada.

Sonda IR:

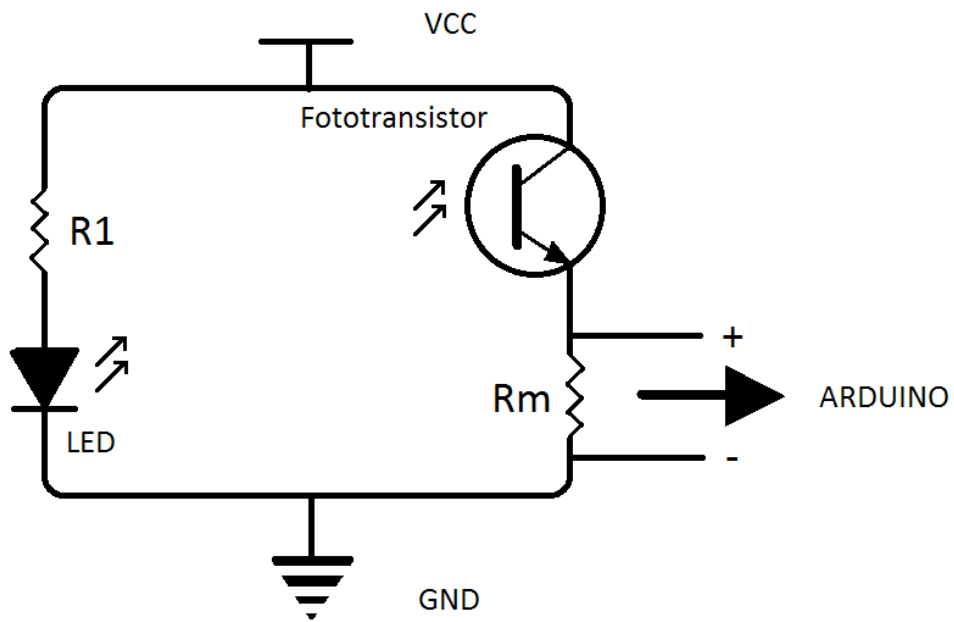


Figura 30A. Esquema del circuito del sensor IR

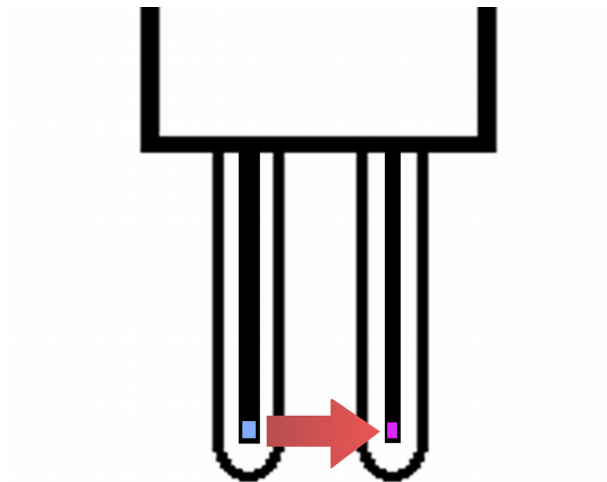


Figura #30B. Esquema de posición de emisor y receptor del sensor IR.

Medidas	17x12x5.6cm (sonda completa) 13.8x12x5.6cm (caja)
Peso	276g

Tabla XI. Datos de la sonda diseñada.

Fuente de alimentación para la sonda:

Esto es opcional. Se trata de un cargador viejo de celular Motorola que se reutilizó para alimentar a la sonda en caso de que hubiese un problema con la tarjeta de adquisición de datos. La tarjeta por sí sola es capaz de alimentar y recibir los datos de la sonda, pero en caso de que hubiese un desperfecto que causara que la tarjeta no funcionara para alimentar, esta es una opción viable para resolver el problema.

Especificaciones	5V, 500mA
Peso	80g

Tabla XII. Datos del cargador.

Mediciones y análisis. Intervalo de conducta lineal y de conducta no lineal

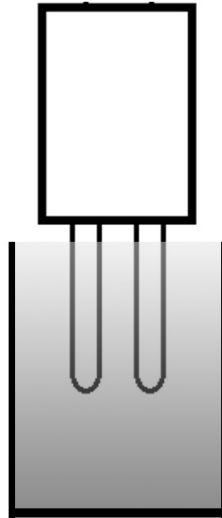


Figura 31. Sonda IR en agua.

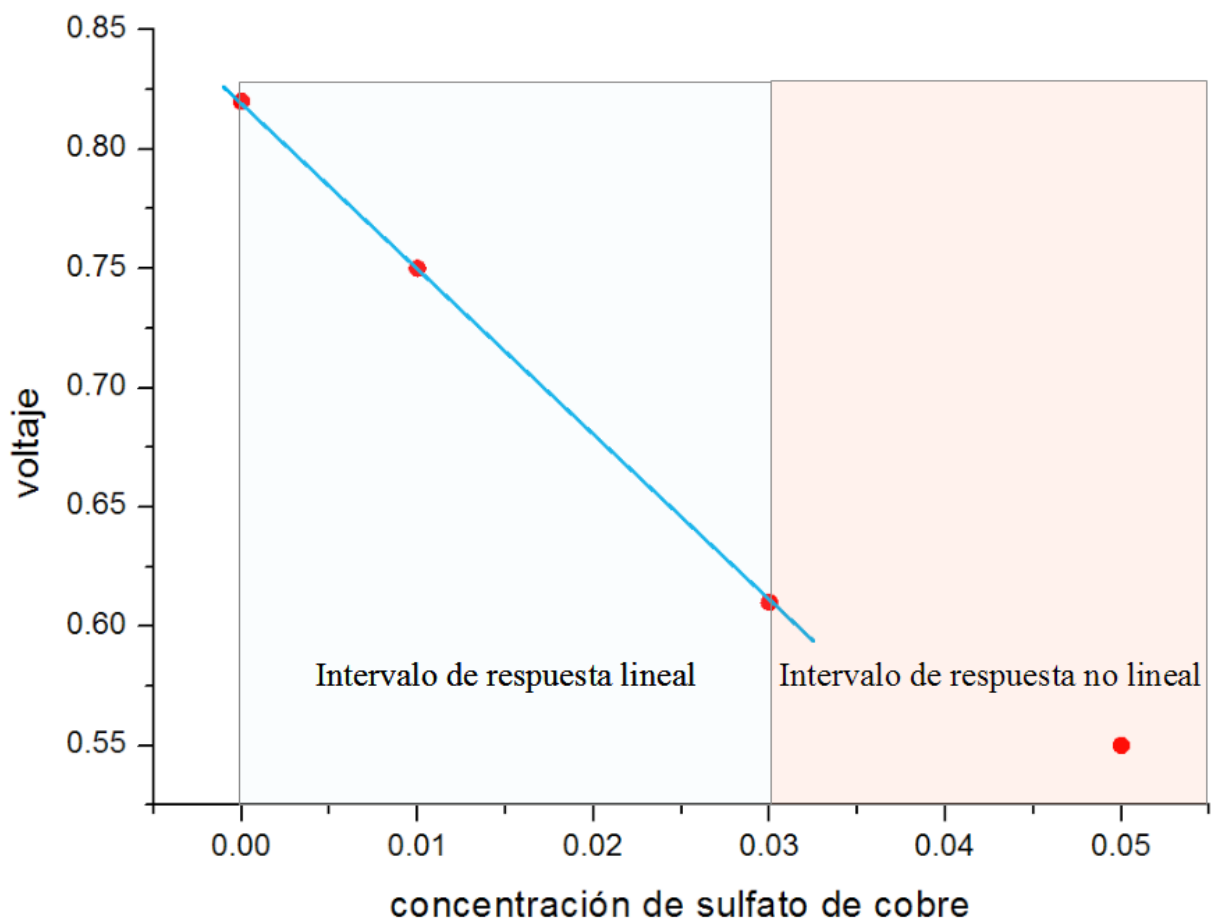
Las mediciones que siguen fueron realizadas con el fin de comprobar que existe un intervalo de respuesta lineal del aparato. Para este propósito se utilizó el programa LabView con un programa diseñado para desplegar y almacenar los datos. Su procesamiento posterior se llevó a cabo utilizando Mathematica.

Los resultados de las mediciones y el origen de las muestras se presentan en la tabla agregada en la siguiente página:

Fuente de la muestra	Lectura en el voltímetro	Observaciones
Aire atmosférico	1.31 voltios	
Agua de garrafón (Departamento de Física de la Universidad de Sonora)	0.82 voltios	Muestra tomada el día 26 de noviembre de 2014
Agua de llave (Departamento de Física de la Universidad de Sonora)	0.82 voltios	Muestra tomada el día 26 de noviembre de 2014
Presa Rodolfo Félix Valdés	0.81 voltios	Muestra tomada el día 16 de noviembre de 2014
Río Sonora	0.82 voltios	Muestra tomada el día 16 de noviembre de 2014
Solución de agua con 1% de sulfato de cobre	0.75 voltios	Preparada en laboratorio
Solución de agua con 3% de sulfato de cobre	0.61 voltios	Preparada en laboratorio
Solución de agua con 5% de sulfato de cobre	0.54 voltios	Preparada en laboratorio

Tabla XIII. Lecturas de las muestras de agua indicadas en la columna izquierda y las fechas en las que se llevó a cabo la toma de muestras.

Sin incluir los resultados de las muestras de la presa Rodolfo Félix Valdés y del río Sonora, la gráfica es la siguiente:



respuesta lineal del dispositivo electrónico.

Amplificación dentro del intervalo de conducta lineal

Muestras completas que sustituyen a la tabla anterior

Orígen	Media (V)	s	media + s	Media - s
Arizona State University	0.807634	$3.087 \cdot 10^{-3}$	0.810721	0.804547
Good Year	0.805699	$2.432 \cdot 10^{-3}$	0.808131	0.803267
Sta Ana	0.810096	$2.673 \cdot 10^{-3}$	0.812769	0.807422
Nogales AZ	0.810511	$2.457 \cdot 10^{-3}$	0.812968	0.808053
Tucson	0.805235	$2.655 \cdot 10^{-3}$	0.80789	0.80258
El 21	0.809724	$2.691 \cdot 10^{-3}$	0.812416	0.807033
Llave V2	0.82416	$5.469 \cdot 10^{-3}$	0.829629	0.818691
Presa V2	0.819591	$2.604 \cdot 10^{-3}$	0.821895	0.817286
Río Sonora	0.817216	$2.222 \cdot 10^{-3}$	0.819439	0.814994
Desionizada	0.82181	$4.196 \cdot 10^{-3}$	0.826006	0.817615
CuS 1%	0.749341	$1.298 \cdot 10^{-3}$	0.750639	0.748043
Garrafón	0.846885	$1.844 \cdot 10^{-3}$	0.848729	0.845041

Tabla XIV. Lecturas medias y desviación estándar de las muestras cuyo origen se presenta en la columna izquierda.

Tomamos como nuestro cero de la concentración de contaminantes al agua de garrafón, que muestra la lectura más alta y como valor extremo extremo el valor 0.01 que corresponde al sulfato de cobre diluido al 1%.

Se obtuvo la gráfica de la figura 31.

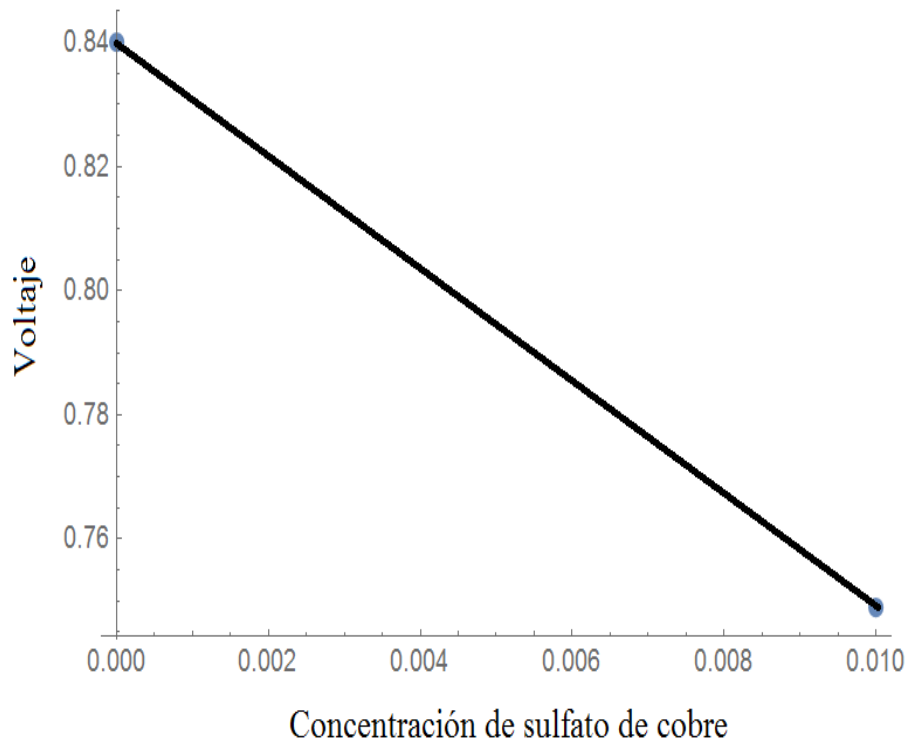


Figura 33. Recta ajustada de concentración contra voltaje.

Ajustamos una recta entre ambos puntos. La pendiente es la que sigue

$$m = (V_2 - V_1) / (c_2 - c_1) =$$

y la recta que se obtiene es

$$V(c) = V_1 + m(C - C_1)$$

con $c_1 = 0$, $c_2 = 0.01$, $V_2 = 0.749341$, $V_1 = 0.846885$.

La recta anterior sirve para calcular voltajes si nos proporcionan las concentraciones, pero nuestro objetivo es otro. El dispositivo nos va a proporcionar una lectura del voltaje y queremos saber a cuál la concentración corresponde. Para eso despejamos y obtenemos la siguiente expresión:

$$c(V) = 0.102518(0.846885 - V)$$

Con esta fórmula traducimos las lecturas presentadas en la tabla XIII y determinamos la cantidad de contaminantes en las muestras. Los resultados son los siguientes:

Origen	Voltaje	Concentración
Arizona State University	0.807634	0.00402393
Good Year	0.805699	0.0042223
Santa Ana	0.810096	0.00377153
Nogales Arizona	0.810511	0.00372898
Tucson	0.805235	0.0042988
Población el 21 (antiguo puesto aduanal)	0.809724	0.00380967
Agua de llave Hermosillo	0.82416	0.00232972
Presa Rodolfo Félix Valdez	0.819591	0.00279812
Río Sonora (al sur de el gavilán)	0.817216	0.0030416
Agua desionizada	0.82181	0.00257063
CuSO ₄ al 1%	0.749341	0.01
Agua de garrafón (Universidad de Sonora)	0.846885	0.00

Tabla XV. Origen de las muestras, voltajes medios y equivalente en concentración si se tratara de sulfato de cobre.

En lenguaje de uso cotidiano la concentración de CuSO₄ al 1% significa que hay una concentración de 1 parte por cien, lo que se traduce en 10 partes por millar. Enseguida expresamos los resultados de la tabla anterior usando partes por millar.

Origen	
Arizona State University	4.02 partes por millar
Good Year	4.22 partes por millar
Santa Ana	3.77 partes por millar
Nogales Arizona	3.72 partes por millar
Tucson	4.3 partes por millar
Población el 21 (antiguo puesto aduanal)	3.81 partes por millar
Agua de llave Hermosillo	2.33 partes por millar
Presa Rodolfo Félix Váldez	2.80 partes por millar
Río Sonora (al sur de el gavilán)	3.04 partes por millar
Agua desionizada	2.57 partes por millar
CuSO ₄ al 1%	10.0 partes por millar
Agua de garrafón (Universidad de Sonora)	0 por selección de referencia

Tabla XV.

Es importante mencionar que la medición de absorción en infrarrojo que estamos presentando detecta la presencia de alguna clase de contaminante pero no permite especificar si se trata de sulfato de cobre o no. Para discriminar entre diversos contaminantes es necesario hacer dispositivos iguales al que estamos presentando pero para las regiones de azul, verde, naranja y rojo. Enseguida, comparar con datos de absorción de los distintos contaminantes potenciales. Esto multiplica el costo aproximadamente por cinco.

Puede observarse que las lecturas de partes por millar más altas corresponden a una región muy bien definida de arizona: la Arizona State University en el campo de Tempe, la población Good Year en el oeste de Phoenix, Tucson.

Santa Ana, Nogales, Arizona y la población el 21 tienen equivalentes partes por millar que son números cercanos entre sí.

En la región cercana a Hermosillo las partes por millar fueron más altas en el río Sonora, al sur de el gavilán, el 16 de noviembre de 2014. En segundo lugar, en orden descendente, el agua de la presa Rodolfo Félix Valdez y en tercer lugar, el agua de llave de Hermosillo, el 26 de noviembre de 2014. Éste resultado es relevante y preocupante porque sugiere la idea de que mientras más al norte se tomaba la muestra en la ribera del río, más alta era la lectura.

Análisis del pH de algunas muestras de agua

El pH es la medida de acidez o alcalinidad de una solución. Este indica la concentración de iones hidronio $[H_3O^+]$ presentes en una muestra. Las siglas significan "potencial de hidrógeno."

La medida de pH del agua es para disponer de uno de los parámetros de calidad cuando está siendo tratada con desinfectantes. Especialmente si se usan compuestos basados en cloro⁽⁶⁾.

El conocimiento del pH es necesario porque cuando las aguas son más alcalinas se requiere mayor dosis del desinfectante diluido en la masa de agua que está siendo tratada. En particular, si el pH está entre 6 y 8, se necesitan de 0.4 a 0.5 miligramos del desinfectante por cada litro de agua. En cambio si el pH está entre 8 y 9 la dosis debe subir a 0.6 miligramos por cada litro de agua. Si el pH resulta superior a 9, el método para desinfectar a base de cloro deja de ser efectivo. Ver referencia ⁽⁶⁾ de nuevo.

Proceso de medición

Se usó un sensor de pH. Las muestras fueron estudiadas en un aula con temperatura controlada a 24 grados centígrados. Éste trae consigo tres muestras de calibración con los valores que se indican en la tabla:

azul	Ph 10
amarillo	Ph 7
rojo	Ph 4

Tabla XVI. Datos del fabricante de la sonda comercial para lectura del pH.

Encontramos que:

- El PH más bajo (que corresponde a una sustancia más ácida) es detectada con un voltaje más alto. Entonces la sustancia que llamamos rojo es la más ácida.
- El PH más alto (menos ácido) se detecta con el voltaje más bajo. Por lo tanto, la sustancia marcada como: azul, es la menos ácida.

Resultados

La medición de cada una de las muestras proporcionó archivos que contienen más de cuatro mil datos cada uno.

Se calculó la media y la desviación estándar de cada uno de ellos y se hizo el análisis tomando en cuenta las medias obtenidas.

Se analizaron nueve muestras de agua provenientes de los sitios de los estados de Sonora y de Arizona que se indican más adelante. Además se realizó la medición de las tres muestras de calibración que contiene el dispositivo.

Los resultados obtenidos son los siguientes:

Procedencia	Nombre del archivo	Voltaje promedio
Sustancia azul	Uno	0.894827
Sustancia amarilla	Dos	1.06147
Sustancia roja	Tres	1.2212
Tucson Arizona (librería Barnes and Noble)	Cuatro	1.05866
Casa particular en Good Year Arizona (población conurbada con Phoenix)	Cinco	1.05342
Sitio el 21 Sonora, agua de llave procedente de pozo, (antes sitio de revisión aduanal)	Seis	1.0282
Arizona State University, campus Tempe (agua de llave)	Siete	1.03635
Nogales Arizona (agua de llave)	Ocho	1.01733
Población de nombre desconocido cerca de phoenix Arizona (agua de llave)	Nueve	1.01668
Universidad de Sonora Hermosillo (agua de llave)	Diez	1.02646
Frasco con agua desionizada con sulfato de cobre diluido al 1%	Once	1.16055

Tabla XVII. Lectura de voltaje para determinar el pH.

Procedencia en la columna de la izquierda.

Los datos del instructivo del dispositivo de medición indican los siguientes pH para las sustancias reconocidas por color:

Sustancia	Ph	Voltaje medio
Azul	10	0.894827
Amarilla	7	1.06147
Roja	4	1.2212

Tabla XVIII. Lecturas de voltaje utilizados para ajustar una curva.

La gráfica de las parejas (Ph,voltaje) aparentan ser ajustadas mediante una curva cuadrática si se utiliza el método de mínimos cuadrados. La gráfica se muestra enseguida

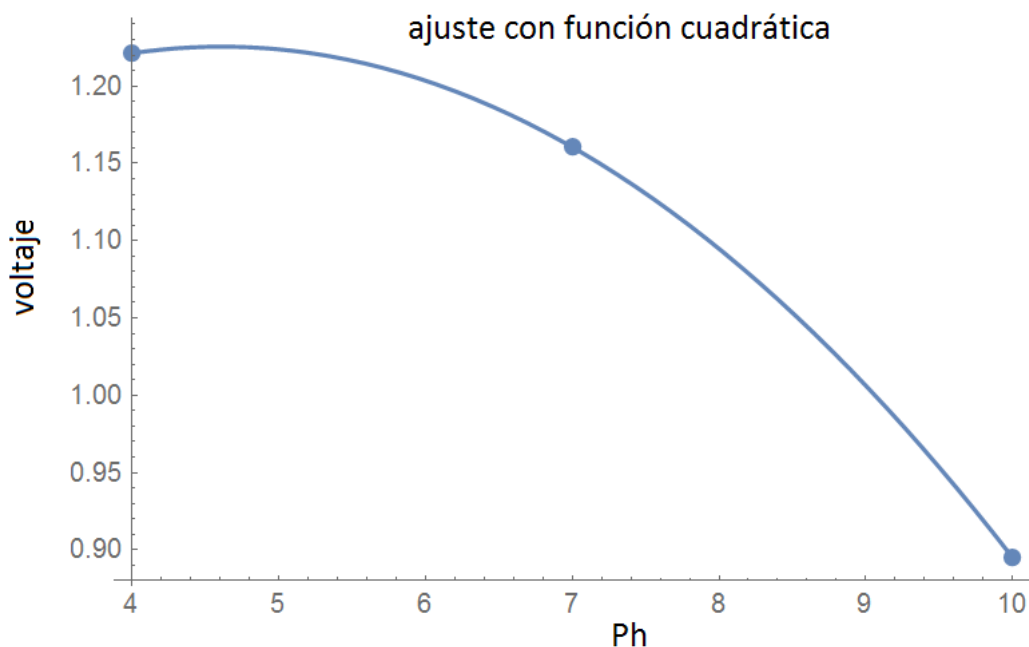


Figura 34. Ph contra Voltaje.

A primera vista el ajuste parece ser el adecuado. La función ajustada fué

$$V(\text{pH})=0.98322+0.105045*\text{ph}-0.0113874*\text{ph}^2$$

pero al calcular su inversa para tener pH(V) y calcular los pH a partir de los voltajes, resultó que predice el valor correcto únicamente para la sustancia azul pero sobreestima el valor de ph de las sustancias amarilla y roja por más de un punto. Los resultados aparentes son:

Sustancia	Voltaje medio	pH
Azul	0.894827	10
Amarilla	1.06147	8.41
Roja	1.2212	5.48

Tabla XIX. La función inversa no produce los valores de pH correctos.

Nótese que no reproducen correctamente los datos para el pH de la sustancia amarilla, pH=7, ni de la roja, pH=4.

Entonces se optó por un ajuste lineal desde los valores de la sustancia azul hasta la amarilla y otro ajuste lineal para los valores desde la sustancia amarilla a la roja. La gráfica es la siguiente:

El procedimiento es el que sigue:

Se formaron parejas ordenadas (V_1, Ph_1) , (V_2, Ph_2) , (V_3, Ph_3) . Y se trabajó con la gráfica anterior. La fórmula a usar es:

$$y-y_1 = m(x-x_1)$$

$$\text{con } m = (y_2-y_1)/(x_2-x_1)$$

En el intervalo de la recta azul uso $x_1 = V_1 = 0.894927$, $y_1 = Ph_1 = 10$ y $x_2 = V_2 = 1.16055$, $y_2 = Ph_2 = 7$. Resulta la recta

$$Ph - 26.1206 - 18.0134V$$

y permite trabajar para voltajes en el intervalo $0.894927 \leq V \leq 1.16055$, que corresponde a diez de los once datos disponibles.

En el intervalo de la recta anaranjada se usó $x_1 = V_1 = 1.16055$, $y_1 = Ph_1 = 7$ y $x_2 = V_2 = 1.2212$, $y_2 = Ph_2 = 4$. Resulta la recta

$$Ph = 26.9362 - 18.8717V$$

y permite trabajar con los voltajes situados en el intervalo $1.16055 \leq V \leq 1.2212$.

Con estas ecuaciones para rectas usamos los valores de los voltajes obtenidos y calculamos los Ph de cada sustancia. El resultado se presenta en la tabla anexada en la página siguiente:

Procedencia	Voltaje promedio	Ph calculado
Sustancia azul	0.894927	10.13
Población de nombre desconocido cerca de phoenix Arizona (agua de llave)	1.01668	7.84
Universidad de Sonora Hermosillo (agua de llave)	1.02646	7.66
Sitio el 21 Sonora, agua de llave procedente de pozo, (antes sitio de revisión aduanal)	1.02802	7.63
Arizona State University, campus Tempe (agua de llave)	1.03635	7.47
Casa particular en Good Year Arizona (población conurbada con Phoenix)	1.05342	7.15
Tucson Arizona (librería Barnes and Noble)	1.05866	7.05
Sustancia amarilla	1.06147	7
Nogales Arizona (agua de llave)	1.0733	6.78
Frasco con agua desionizada con sulfato de cobre diluido al 1%	1.16055	5.14
Sustancia roja	1.2212	4.12

Tabla XX. El ajuste de dos rectas mejora la reproducción del pH dado por el fabricante.

Usando estas rectas se estima la acidez de las muestras.

Todas las muestras de agua se encuentran dentro del intervalo recomendado de 6.5 a 8.5 de pH.

Conclusiones

En este trabajo se presentaron elementos para demostrar que las poblaciones del río Sonora que fueron afectadas por el derrame de material contaminado en esa vía pluvial no tienen posibilidades económicas para financiar los estudios de agua que requieren periódicamente. Se hizo ver que existen medios científicos para colaborar con ellos, pero con la desventaja de que son extremadamente caros, o en el caso de las instituciones académicas, comprometidos para ser usados en objetivos específicos marcados con tiempos límite.

A raíz de lo anterior se planteó un estudio de factibilidad para saber si es posible construir dispositivos electrónicos baratos, que usen componentes disponibles en el mercado local y que no sean demasiado complicados de usar.

El requisito de sencillez en su uso permite entrenar a personas que tengan estudios de bachillerato pero con el agregado de haber cubierto satisfactoriamente cursos de álgebra y de geometría analítica.

Se desarrolló una técnica simple de caracterización de LEDs para determinar cuál es la fuente de luz más adecuada. Se llegó a la conclusión de que trabajar en el rango del espectro de radiación infrarroja es la más conveniente porque así se garantiza la detección de sulfato de cobre, que es la componente de contaminación que genera el interés en este trabajo.

Se llegó a la conclusión de que un solo dispositivo permite detectar contaminantes que absorben en la región infrarroja, pero con la dificultad de que las sustancias presentes podrían ser: sulfato de cobre, o también, componentes de calcio, magnesio, o manganeso. Típicas de las aguas que son llamadas duras.

La falta de especificidad con un solo dispositivo se puede resolver si se dispone de varias sondas similares pero equipadas con parejas de emisor y receptor en otras regiones del espectro electromagnético.

El dispositivo desarrollado permite emitir luz infrarroja que atraviesa una muestra de agua para que sea detectada en un sensor que se encuentra a aproximadamente un centímetro de distancia. Enseguida la intensidad de la señal luminosa recibida se traduce a voltaje.

Se estudiaron muestras de sulfato de cobre con dos propósitos: 1) detectar la zona lineal del dispositivo construido, 2) confeccionar una tabla de voltaje respecto a concentración para obtener la ecuación de una recta que relacione la concentración de este contaminante con la lectura de voltaje en un multímetro.

Se analizó agua de varias fuentes de la zona geográfica central y norte de Sonora, así como de la parte central y sur de Arizona. A partir de ellas se encontraron variaciones en la lectura del voltaje. Esto muestra que el dispositivo funciona y que es de utilidad para revelar la presencia de contaminantes.

En lo relativo a la región cercana a la ciudad de Hermosillo, encontramos que la absorción de luz infrarroja era más alta al sur de el gavilán (16 de noviembre de 2014). En segundo lugar, en orden descendente, el agua de la presa Rodolfo Félix Valdéz (16 de noviembre de 2014) y en tercer lugar, el agua de llave de Hermosillo (26 de noviembre de 2014). Éste es un resultado que es relevante y preocupante porque sugiere la idea de que mientras más al norte se tomaba la muestra en la ribera del río, más alta era la lectura.

El costo del dispositivo cuando el costo del dólar era inferior a \$16.50 pesos mexicanos fue inferior a \$2 500 pesos moneda nacional. Por lo tanto, un dispositivo que incluya las regiones: azul, rojo, naranja y verde llevaría el costo del sistema a un poco más de \$10 000

pesos mexicanos. Es posible incluir una variación del dispositivo en la región ultravioleta pero el costo es superior al que hemos desarrollado para infrarrojo.

El sistema de lectura y graficado de datos requiere conocimiento de geometría analítica para entender la ecuación de la recta y el significado de una función lineal. Son conocimientos al alcance de un estudiante de bachillerato que curse satisfactoriamente el área llamada de físicomatemáticas.

En términos gruesos. Cualquier municipio que cumpla con lo siguiente: 1) destinar \$20 000 pesos mexicanos a la construcción de cinco dispositivos similares al presentado aquí, y 2) que disponga de un estudiante de bachillerato con las características mencionadas, puede disponer de un sistema de análisis preliminar que permita generar una alerta bien documentada para solicitar la intervención de autoridades estatales y federales que cuenten con mayor financiamiento y acceso a estudios realizables en laboratorios certificados oficialmente.

Referencias

(1) Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), Derrame de sulfato de cobre, río Bacanuchi, (afluente del río Sonora), presentada en el sitio

<https://www.gob.mx/profepa/prensa/ordena-profepa-remediacion-por-derrame-de-acido-sulfurico-en-rio-sonora?idiom=es>

(2) Crónica Ambiental, octubre de 2014, publicada en el sitio

<https://www.cronicaambiental.com.mx/>,

(3) Animal Político, 20 de octubre de 2015, publicado en el sitio

<http://www.animalpolitico.com/2015/10/la-contaminacion-en-el-rio-sonora-supero-hasta-31-mil-veces-la-norma/>

(4) Water pollution control: a guide to the use of water quality management principles. Cap 2., publicado en el sitio

http://www.who.int/water_sanitation_health/resourcesquality/watpolcontrol.pdf.

(5) Agenda del agua 2030, publicado en el sitio

<http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/SGP-3-11Cuadernillo-Agenda-del-Agua2030Final.pdf>.

(6) Water pollution control: a guide to the use of water quality management principles. Cap 5. UNEP, WSSCC, and WHO. (1997)., publicado en el sitio

http://www.who.int/water_sanitation_health/resourcesquality/watpolcontrol.pdf.

Ver: Guidelines for Drinking-water Quality, p. 119, Third Edition, publicado en el sitio

http://www.who.int/water_sanitation_health/dwg/fulltext.pdf?ua=1

(7) Presupuesto de Ingresos y Egresos 2015, Universidad de Sonora, Cuadro 3, publicado en el sitio

http://www.uson.mx/institucional/marconormativo/presupuesto_ingresosyegresos2015.pdf

(8) P. Atkins, J. de Paula, *Physical Chemistry*, 8th. edition, 2006

(9) Environmental Protection Agency (EPA), Secondary Drinking Water Standards: Guidance for Nuisance Chemicals, publicado en el sitio

<https://www.epa.gov/dwstandardsregulations/secondary-drinking-water-standards-guidance- nuisance-chemicals>.

(10) Alibaba Group, publicado en el sitio https://www.alibaba.com/product-detail/water-analysis-equipment-ph-P260_1322557836.html?s=p

(11) Alibaba Group, publicado en el sitio https://www.alibaba.com/product-detail/Mini-x-ray-analysis-equipment_681508685.html

(12) Alibaba Group, publicado en el sitio https://www.alibaba.com/trade/search?fsb=y&IndexArea=product_en&SearchText=spectrophotometer&isGalleryList=G

(13) Aquaread, Water Monitoring Instruments, publicado en el sitio

<http://www.aquaread.com/portofolio/ap-5000/>

(14) Labcompare, The Buyer's Guide for Laboratory Equipment, publicado en el sitio

<http://www.labcompare.com/Environmental-Test-Equipment/945-Water-Testing-Equipment/>

(15) Ng. Chee-Loon, S. Senft-Grupp, and H. F. Hemond, "A multi-platform optical sensor for in situ ensing of water chemistry", *Limnol. Oceanogr.: Methods* 10, 2012, 978–990

(16) S. Schaefer, "Colorimetric Water Quality Sensing with Mobile Smart Phones", B.A.Sc.,

The University of British Columbia, BC Canada, 2012.

- (17) X. ZHANG; Y. FANG; Y. Zhao, "A Portable Spectrophotometer for Water Quality Analysis", *Sensors & Transducers*, Vol. 148, Issue 1, p47, Jan 2013.
- (18) Halas Nanophotonic Group, Rice University, Tex, USA., publicado en el sitio <http://halas.rice.edu/conversions>
- (19) American Society of Limnology and Oceanography Inc., "Light absorption by aquatic particles in the near-infrared spectral region", *Limnol. Oceanogr.* 47(3), 911-915, 2002.
- (20) G. Smith y J. J. Drake, "Collisional broadening of the calcium infrared triplet lines by atomic hydrogen", *Mon. Not. R. Astr. Soc.* 231 115-123, 1988.
- (21) Water Analysis using LAMBDA Spectrophotometer: Nitrate Nitrogen (NO₃-N), Brucine Method, Applications Note, UV/Visible Spectroscopy, publicado en el sitio <http://www.slideshare.net/PerkinElmer/water-analysis-using-lambda-spectrophotometer>
- (22) C. E. Carnicom, "The biggest crime of all time", 01 Mar 2011, publicado en el sitio <https://carnicominate.org/wp/the-biggest-crime-of-all-time/?print=print>
- (23) La expresión para la transmitancia del CaCO₃ se encuentra en: National Institute of Standard and Technology, Calcium carbonate (precipitated), publicado en el sitio <http://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=C471341&Mask=80>
- (24) Royal Society of Chemistry, "A new nano-sized calcium hydroxide photocatalytic material for the photodegradation of organic dyes", *RSC Adv.*, 2014, 4, 15835-15840. DOI: 10.1039/C4RA00081A (Paper), publicado en el sitio <http://pubs.rsc.org/-/content/articlehtml/2014/ra/c4ra00081>^a
- (25) La teoría física fue tomada de Robert Eisberg, R. Resnick, "*Física Cuántica*", Limusa Wiley.

Agradecimientos

Agradecemos a las señoritas: Karol Yesenia Hernández Giottonini y Marcia Pamela Ibarra Estrada, egresadas del Postgrado en Nanotecnología del Departamento de Física, por su colaboración en la preparación de las muestras de sulfato de cobre diluido. También agradecemos al joven Francisco Adrián Duarte Alcaráz, estudiante del Doctorado en Física del Departamento de Investigación en Física, por el cálculo de las propiedades del sulfato de cobre.