

Ensamblaje, calibración y puesta a prueba de sensor de turbidez de bajo costo para monitoreo de calidad de agua

Low cost turbidity sensor assembly, calibration and testing for water quality monitoring

Adolfo Enrique Guerrero-Escobedo^{1*}; Carlos Vásquez-Blas¹; Wilson Reyes-Lázaro¹; Ernesto Segundo Wong-López¹; Hernán Edwin Verde-Luján²

¹Universidad Nacional de Trujillo, Trujillo, Perú

²Universidad Nacional de Barranca, Lima, Perú

RESUMEN

En este artículo se describe la metodología utilizada para ensamblar un turbidímetro a partir de un conjunto de dispositivos electrónicos, compuesto por un sensor, un módulo de conversión de datos y un microcontrolador Arduino. Los elementos fueron ensamblados siguiendo las especificaciones técnicas, y se realizó la codificación necesaria para su funcionamiento. El objetivo fue determinar la curva de calibración del sensor de turbidez con la ayuda del turbidímetro comercial HACH 2100Q. Se prepararon ocho mezclas de arcilla y agua en diferentes proporciones; para cada una de ellas se tomaron 10 lecturas de voltaje con el sensor y 10 lecturas de turbidez con el equipo HACH. Se evaluó la correlación entre ambas variables obteniendo una ecuación cuadrática con R^2 igual al 99,87%. El porcentaje de error de las mediciones fue de 1,75%. Los parámetros estadísticos "p" para los coeficientes del modelo y para el análisis de varianza fueron menor de 0,05 indicando la significancia al 95%. El rango de turbidez evaluado fue de 0 – 500 ppm.

Palabras clave: Arduino; código; monitorear; turbidímetro

ABSTRACT

This article describes the methodology used to assemble a turbidimeter from a set of electronic devices, consisting of a sensor, a data conversion module, and an Arduino microcontroller. The elements were assembled following the technical specifications, and the necessary coding for its operation was carried out. The objective was to determine the calibration curve of the turbidity sensor with the help of the commercial HACH 2100Q turbidimeter. Eight mixtures of clay and water in different proportions were prepared; for each of them, 10 voltage readings were taken with the sensor and 10 turbidity readings with the HACH equipment. The correlation between both variables was evaluated, obtaining a quadratic equation with R^2 equal to 99.87%. The percentage error of the measurements was 1.75%. The statistical parameters "p" for the coefficients of the model and for the analysis of variance were less than 0.05, indicating significance at 95%. The turbidity range evaluated was 0 – 500 ppm.

Keywords: Arduino; code; monitor; turbidimeter

Cómo citar / Citation: Guerrero-Escobedo, A. E., Vásquez-Blas, C., Reyes-Lázaro, W., Wong-López, E. S. & Verde-Lujan, H. E. (2023). Ensamblaje, calibración y puesta a prueba de sensor de turbidez de bajo costo para monitoreo de calidad de agua. *QuanTUNAB*, 1(2), e16. <https://doi.org/10.52807/qunab.v1i2.16>

1. INTRODUCCIÓN

La utilización de sensores económicos resulta altamente beneficiosa para ampliar el alcance de la investigación científica. La medición de la turbidez es un parámetro fundamental para monitorear la calidad del agua, el cual no puede faltar en un laboratorio de análisis fisicoquímicos. La medición de los sólidos suspendidos totales se puede realizar a través de dispersión o transmitancia, utilizando un fototransistor detector y un diodo infrarrojo como emisor de luz (Kelechi et al., 2021). En este sentido, se pueden emplear sensores tal como se describe en este trabajo. No obstante, es esencial calibrar el sensor de un equipo comercial para contar con la confiabilidad necesaria en la toma de lecturas.

Si bien es importante contar con equipos de medición de turbidez, en diversos casos la adquisición de un turbidímetro comercial puede resultar costosa, lo que limita su disponibilidad en los laboratorios. Por ejemplo, un turbidímetro comercial puede costar alrededor de 1,000 USD, mientras que un equipo diseñado con sensores puede costar solo 150 USD, es decir, hasta el 4% del precio del dispositivo comercial (De Boer Dias et al., 2019; Román-Herrera et al., 2016). Es por ello que cada vez es más frecuente el diseño de turbidímetros de bajo costo y adecuada precisión, que además pueden conectarse a internet de manera inalámbrica y reportar datos de turbidez en tiempo real (Wang et al., 2018).

Para construir estos equipos, se utilizan diferentes componentes electrónicos, como leds infrarrojos con fotodetectores, fibra óptica, fotodetectores duales ortogonales y módulos de turbidez. También se emplean leds de diferentes longitudes de onda, láser de fibra y detector, así como piezas impresas en 3D y plástico reciclado. Además, se utilizan leds RGB junto con fotodetectores BH1750 (Arifin et al., 2017; De Boer Dias et al., 2019; Kitchener et al., 2019; Guerrero Escobedo et al., 2021; Prerana et al., 2012; Wang et al., 2018).

Gracias a su principio de funcionamiento óptico, el sensor de turbidez se puede utilizar para evaluar otras mediciones, como las concentraciones de sólidos suspendidos totales (TSS), partículas de carbono, partículas de nitrógeno y/o fósforo total (Irvine et al., 2019; Snyder et al., 2018). La turbidimetría también tiene aplicaciones en el campo de los procesos biotecnológicos para el cultivo de células (Acebo-González & Hernández-García, 2013).

Estos sensores pueden ser utilizados en muestras de agua de distintas calidades y cuerpos de agua, tales como lagos, ríos y piscigranjas, según se reporta en investigaciones realizadas por (Irvine et al., 2019; Parra et al., 2018; Trevathan et al., 2020). El monitoreo puede ser puntual o en tiempo real a través de internet, como se ha demostrado en diversas investigaciones (Parra et al., 2018).

Entre las ventajas de utilizar estos sensores, se encuentra su bajo consumo de energía, facilidad de uso, peso ligero y bajo costo. Pruebas de laboratorio han demostrado que las lecturas obtenidas por estos sensores son comparables a las obtenidas con equipos comerciales (Azman et al., 2016).

En este estudio se seleccionó el sensor modelo TS-300B para medir la turbidez de muestras de agua debido a su bajo costo, peso ligero, baja potencia, estabilidad y facilidad de disponibilidad o importación. Además, se destacó la facilidad de adquisición y la posibilidad de transmisión de datos por internet mediante el uso complementario de microcontroladores Arduino, como se ha demostrado en investigaciones previas (Gunawardena et al., 2018; Trevathan et al., 2021; Wickert et al., 2019).

El objetivo principal del estudio fue determinar la curva de calibración del sensor de turbidez modelo TS-300B, con el fin de contar con un equipo barato y confiable para investigaciones en el área de monitoreo de la calidad del agua para consumo y tratamiento de aguas residuales o efluentes en general. Para ello, se emplearon mezclas de agua y arcilla, y los datos obtenidos se compararon con los de un turbidímetro comercial HACH 2100 Q.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

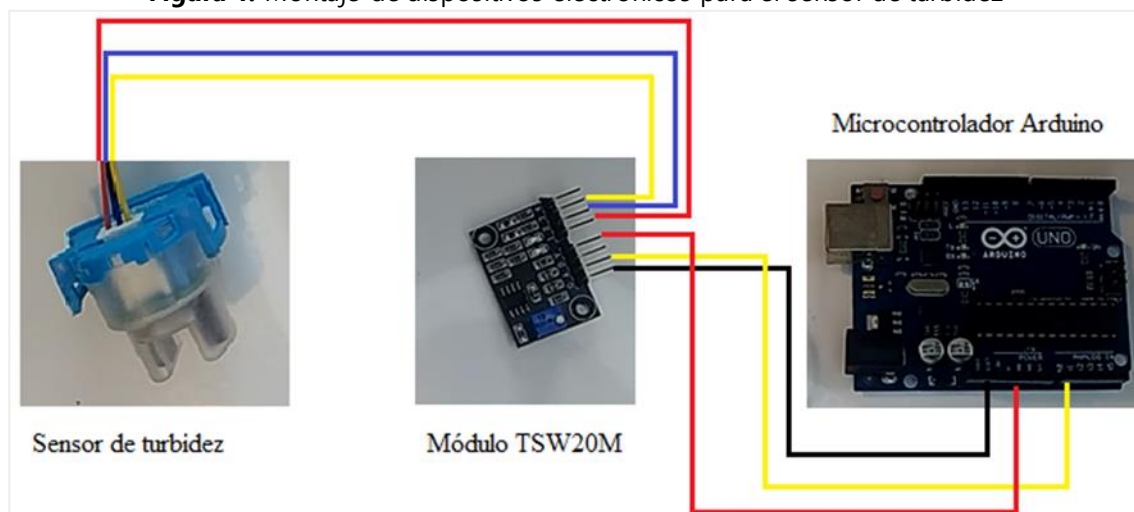
2.1. Materiales empleados

Los materiales utilizados en la presente investigación fueron:

- Material de vidrio diverso de laboratorio como vasos de precipitación y varillas de vidrio.
- Balanza analítica H.W. Kessel modelo GH-252, capacidad de 250 g, resolución de 0,0001 g.
- Agitador magnético marca Heidolph modelo MR 3001K, el cual integra un sistema de control automático de temperatura.
- Sensor de turbidez modelo TS-300B, 5V DC, 30 mA, -30 – 80°C, 0 – 1000 NTU, consta de un diodo infrarrojo y un fototransistor posicionados uno en frente de otro. La luz detectada por el fototransistor es traducida en señal de voltaje que, mediante una curva de calibración, se convierte matemáticamente en unidades de turbidez. De esta forma se detecta el grado de absorción de la luz por las partículas sus-pendidas o sólidos totales disueltos.
- Turbidímetro HACH 2100 Q, equipo portátil de lámpara de tungsteno que ofrece una alta exactitud en la medición de turbidez incluso para muestras de rápida sedimentación.
- Módulo de sensor de turbidez TSW20 M, convierte la señal del sensor modelo TS-300B en señal de voltaje. A menor voltaje, mayor será la turbidez de la muestra.
- Microcontrolador Arduino, es una tarjeta de interfase con entradas y salidas analógicas y digitales para la conversión de las señales de voltaje de sensores a lenguaje máquina.

2.2. Ensamblaje de los elementos del módulo de turbidez:

El módulo de turbidez está integrado por el sensor modelo TS-300B, el módulo del sensor TSW-20 M y el microcontrolador Arduino. Se conectan los cables del sensor de turbidez de la siguiente forma: Cable rojo al pin 1 (ánodo/colector) del módulo, cable azul al pin 2 (emisor) del módulo, cable amarillo al pin 3 (cátodo).

Figura 1. Montaje de dispositivos electrónicos para el sensor de turbidez

Posteriormente, se hicieron las conexiones pertinentes entre el módulo y el microcontrolador. Conectando el pin G del módulo, con cable negro, hacia el pin Ground del microcontrolador. El pin A, con cable amarillo, con el pin A0 del microcontrolador y finalmente el pin V, con cable rojo, al pin 5V del microcontrolador.

2.3. Codificación

La codificación está basada en usuarios de Arduino quienes comparten programas en internet sin interés comercial (How To Electronics, 2022). El software de esta marca de dispositivos electrónicos es gratuito y está disponible en internet. El código ha sido modificado en la ecuación que representa la curva de calibración en dos aspectos: en el número de lecturas para la obtención de un valor promedio representativo y en el valor máximo de turbidez según los datos experimentales.

La figura 2 muestra el bucle para que el software registre 1000 datos y se obtenga un promedio de voltaje "v". La lectura analógica del sensor debe ser convertida a valor de voltaje dividiéndola entre 1023 y multiplicándola por 5. El valor de f es un factor de corrección o ajuste que deberá cambiarse cada cierto tiempo para una adecuada toma de lecturas. Se especifica que, a voltajes menores de 3, la turbidez de la muestra será máxima debido a que las muestras se prepararán entre un rango de 0 a 500 NTU (unidades nefelométricas de turbidez). Para lecturas de voltajes mayores a 3, el software calculará la turbidez "T" con la ecuación: $T = A*v^2 + B*v - C$, siendo A, B y C los coeficientes que resultarán de correlacionar los valores medidos de voltaje (V) y turbidez (T).

Figura 2. Codificación básica para el funcionamiento del sensor de turbidez en el software Arduino

```

void loop( )
{
  v= 0;
  for (int i = 0; i<1000;i++)
  {
    v += ((float)analogRead(pin)/1023)*5*f;
  }
  v = v/1000;
  if(v< 3 ) {
    T = 500 ;
  }else
  {
    T = A*square(v)+ B*v - C;
  }
}

```

2.4. Curva de calibración

Convencionalmente se utilizan soluciones de formazina como patrones para la calibración de turbidímetros; sin embargo, la obtención de estos compuestos es difícil y medianamente costosa, y además presentan un potencial carcinogénico y niveles tóxicos preocupantes (De Boer Dias et al., 2019). Se propone una técnica fácil, segura y no costosa, por ello se prepararon mezclas de agua y arcilla codificadas como m1, m2, m3, m4, m5, m6, m7 y m8 con cantidades de arcilla de: 0,0123 g, 0,0205 g, 0,0316 g, 0,0416 g, 0,0505 g, 0,0799 g, 0,1034 g, 0,1214 g respectivamente. La cantidad de agua utilizada para todas las mezclas fue de 200 mL. La utilización de arcilla para este propósito ya ha sido evaluada en trabajos similares (Azman et al., 2016).

Cada mezcla fue agitada en el Agitador magnético Heidolph modelo MR 3001K durante un minuto y se procedieron a registrar las tensiones o voltajes con el sensor de turbidez modelo TS-300B. Posteriormente, se midió a cada mezcla la turbidez con el Turbidímetro HACH 2100 Q. Se tomaron 10 lecturas de tensión y 10 lecturas de turbidez a cada mezcla y se obtuvieron 8 valores promedio de tensión y 8 valores promedios de turbidez. Para obtener la curva de calibración se correlacionaron los datos promedio de turbidez, tensión y se aplicó regresión cuadrática. Es necesario considerar que al igual que los turbidímetros comerciales, se debe "cerar" al sensor de turbidez antes de su utilización. Para ello, utilizar agua destilada limpia y proceder a medir voltaje y turbidez con el sensor. Para un valor de cero turbidez, el voltaje debe ser de 4,2 V. Antes de hacer las mediciones en las mezclas, se hicieron mediciones de turbidez en agua. Cuando el sensor no reportó un valor de cero turbidez para el agua destilada limpia, se ajustó el valor de "f" en la programación utilizando una simple técnica de regla de tres.

2.5. Estadística

Los promedios, medianas y desviación estándar de las lecturas de turbidez y voltaje se obtuvieron empleando el software Minitab V.19. De la misma forma, los coeficientes de regresión, el análisis de significancia de los coeficientes del modelo de turbidez versus voltaje y el análisis de varianza (ANOVA) se realizaron con el software mencionado.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 3 muestra el módulo de turbidez armado y algunas mezclas preparadas para la medición de voltaje y turbidez.

Figura 3. Puesta a prueba del módulo de turbidez



En la Tabla 1 se presentan los valores promedios, medianas y desviación estándar de las lecturas de voltaje y turbidez para las mezclas de agua y arcilla codificadas con m1, m2, m3, m4, m5, m6, m7 y m8.

Tabla 1. Promedios, Medianas y Desviación Estándar de las lecturas de voltaje (v) y turbidez (T) para las diferentes mezclas de agua y arcilla

Muestra	Promedios		Medianas		Desviación Estándar	
	v	T	v	T	v	T
	(V)	(NTU)	(V)	(NTU)	(V)	(NTU)
m1	3,96	17,1	3,98	14	0,05	7,34
m2	3,81	49,2	3,8	52,8	0,03	9,00
m3	3,57	147	3,57	145	0,02	12,62
m4	3,46	208	3,46	205	0,03	18,11
m5	3,27	323	3,28	322	0,01	2,91
m6	3,25	355	3,25	356	0,03	1,08
m7	3,17	410	3,17	410	0,02	4,29
m8	3,10	495	3,09	495	0,04	5,70

Nota: V: voltios, NTU: unidad de turbidez nefelométrica

En la Figura 4, se muestra la curva de regresión de la turbidez en función del voltaje. En la Tabla 2 se informa que el coeficiente de regresión R^2 es igual a 99,87%. Se recomienda realizar más de una curva de calibración por intervalos; sin embargo, por el rango de evaluación de turbidez de 0 – 500 NTU no fue necesario (De Boer Dias et al., 2019). Las ecuaciones de calibración obtenidas no tienen que ser iguales a otros trabajos, porque dependerá principalmente de los fotodetectores utilizados.

Figura 4. Turbidez medida con equipo HACH versus voltaje medido con sensor modelo TS-300B (T: Turbidez, v: Voltaje)

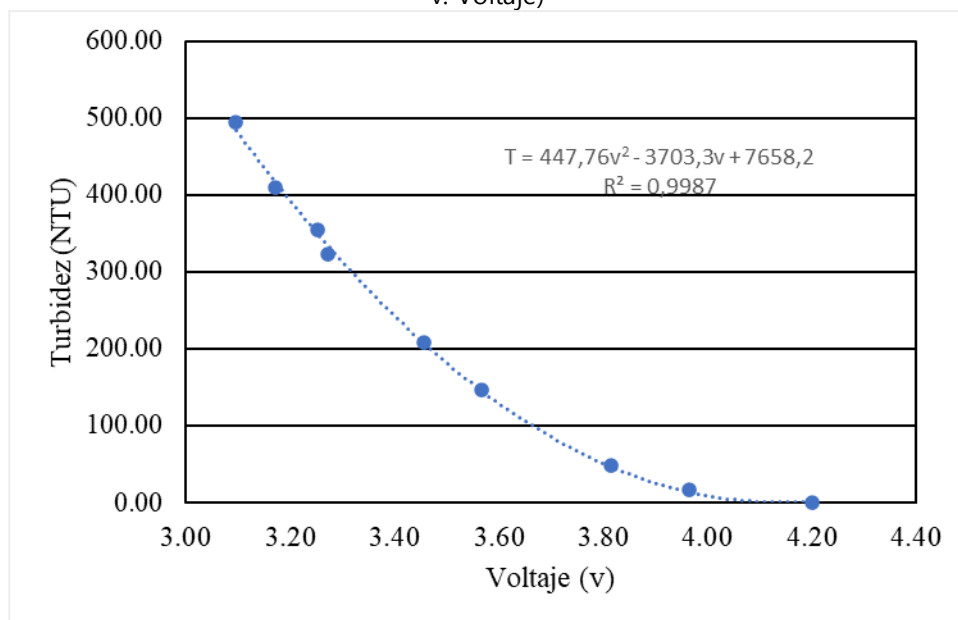


Tabla 2. Coeficientes de regresión y desviación estándar para la relación entre Turbidez y voltaje

Desviación Estándar	R^2	R^2 (ajustado)	R^2 (predicho)
7,65	99,87%	99,82%	99,63%

En las Tablas 3 y 4 se muestran los estadísticos para los coeficientes del modelo de regresión, así como el análisis de varianza. El valor p es menor que 0,05 para todos los casos indicando que los parámetros del modelo son significativos al 95%.

Tabla 3. Coeficientes del modelamiento y parámetros estadísticos de error y significancia para la relación entre Turbidez y voltaje

Término	Coeficiente	Error estándar del coeficiente	Valor T	Valor p
Constante	7658,20	311,00	24,59	0,00
v	-3703,30	173,00	-21,40	0,00
v*v	447,76	23,80	18,79	0,00

Tabla 4. Análisis de Varianza de la regresión entre Turbidez y voltaje

Fuente	GL	SC Ajust.	CM Ajust.	Valor F	Valor p
Regresión	2	264278	132139	2257,15	0,00
v	1	26798	26798	457,75	0,00
v*v	1	20674	20674	353,15	0,00
Error	6	351	59		
Total	8	264629			

Nota: GL: Grados de libertad, SC Ajust.: sumas ajustadas de los cuadrados, CM Ajust.: Cuadrados medios ajustados

En la Tabla 5 se muestran medidas comparativas entre el sensor de turbidez y el turbidímetro HACH 2100 Q. El porcentaje de error relativo promedio es de 1,79%, valor bastante aceptable para considerar que las mediciones realizadas con el sensor son adecuadas y estadísticamente confiables al 95% según las tablas 3 y 4. El error obtenido se encuentra dentro del rango de errores máximos, reportados en otros trabajos, tales como 3,12%, 3,3%, 1,12%, 10% (Azman et al., 2016; De Boer Dias et al., 2019; Nuzula et al., 2017; Román-Herrera et al., 2016).

Tabla 5. Validación de medidas de turbidez del sensor TS-300B con el equipo HACH 2100Q

Muestra	Turbidez (NTU)		%Error
	Sensor TS-300B	HACH 2100Q	
1	58,7	60,4	2,81
2	110,6	115	3,83
3	231,2	230	0,52
4	317,2	320	0,88
5	465,7	470	0,91
	Promedio		1,79

CONCLUSIONES

La curva de calibración obtenida fue $T = 447,76v^2 - 3703,3v + 7658,2$ con un coeficiente de regresión R^2 de 99,87%. Los parámetros estadísticos "p" para los coeficientes del modelo y para el análisis de varianza muestran que las variables son significativas al 95%; adicionalmente, el porcentaje de error promedio fue de 1,75% entre las mediciones obtenidas con el turbidímetro comercial y el sensor cumpliéndose satisfactoriamente el objetivo trazado de este estudio.

La obtención de la curva de calibración constituye el punto de partida para futuras investigaciones a bajo costo, pues el uso de sensores y tarjetas de interfase representan menos costo que la compra de

un turbidímetro convencional. Por lo tanto, los sensores de turbidez se pueden utilizar para monitorear la calidad de todo tipo de aguas superficiales y subterráneas, así como el de efluentes industriales y el agua resultante de sus tratamientos ambientales. Según los datos estadísticos, estos instrumentos de medición son confiables para la investigación científica.

FINANCIAMIENTO

Ninguno.

CONFLICTO DE INTERESES

No existe ningún tipo de conflicto de interés relacionado con la materia del trabajo.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

Conceptualización: Guerrero-Escobedo, A. E., Vásquez-Blas, C., Wong-López, E. S. y Verde-Luján, H. E.

Curación de datos: Vásquez-Blas, C. y Verde-Luján, H. E.

Análisis formal: Wong-López, E. S. y Guerrero-Escobedo, A. E.

Investigación: Guerrero-Escobedo, A. E., Vásquez-Blas, C., Wong-López, E. S. y Verde-Luján, H. E.

Metodología: Wong-López, E. S. y Verde-Luján, H. E.

Supervisión: Guerrero-Escobedo, A. E.

Redacción-borrador original: Guerrero-Escobedo, A. E. y Vásquez-Blas, C.

Redacción-revisión y edición: Wong-López, E. S. y Verde-Luján, H. E.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Acebo-González, D., & Hernández-García, A. T. (2013). Los métodos Turbidimétricos y sus aplicaciones en las ciencias de la vida. *Revista CENIC. Ciencias Biológicas*, 44(1), 1–18. <https://www.redalyc.org/pdf/1812/181226886003.pdf>

Arifin, A., Irwan, I., Abdullah, B., & Tahir, D. (2017). Design of sensor water turbidity based on polymer optical fiber. *2017 International Seminar on Sensors, Instrumentation, Measurement and Metrology (ISSIMM)*, 146–149. <https://doi.org/10.1109/ISSIMM.2017.8124280>

Azman, A. A., Rahiman, M. H. F., Taib, M. N., Sidek, N. H., Abu Bakar, I. A., & Ali, M. F. (2016). A low cost nephelometric turbidity sensor for continual domestic water quality monitoring system. *2016 IEEE International Conference on Automatic Control and Intelligent Systems (I2CACIS)*, 202–207. <https://doi.org/10.1109/I2CACIS.2016.7885315>

De Boer Dias, C., Minetto, B., Tassi, R., & Allasia Picillini, D. G. (2019). Desenvolvimento e calibração de turbidímetro de baixo custo. *XXIII Simposio Brasileiro de Recursos Hídricos*. <http://abrh.s3.amazonaws.com/Eventos/Trabalhos/107/XXIII-SBRH0940-1-20190512-191607.pdf>

Guerrero Escobedo, A. E., Mendoza Bobadilla, J. L., Verde Luján, H. E., Rodriguez Espinoza, R. F., Celis Rojas, S. R., Leiva Jacobo, P. A., & Pedro Vilchez, S. A. (2021). Remoción de

- turbidez de aguas del canal madre de Chavimochic empleando diseño de mezcla de coagulantes. *Alpha Centauri*, 2(3), 60–71. <https://doi.org/10.47422/ac.v2i3.41>
- Gunawardena, N., Pardyjak, E. R., Stoll, R., & Khadka, A. (2018). Development and evaluation of an open-source, low-cost distributed sensor network for environmental monitoring applications. *Measurement Science and Technology*, 29(2), 024008. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/aa97fb>
- How To Electronics. (2022). *DIY Turbidity Meter using Turbidity Sensor & Arduino*. <https://how2electronics.com/diy-turbidity-meter-using-turbidity-sensor-arduino/>
- Irvine, C. A., Backus, S., Cooke, S., Dove, A., & Gewurtz, S. B. (2019). Application of continuous turbidity sensors to supplement estimates of total phosphorus concentrations in the Grand River, Ontario, Canada. *Journal of Great Lakes Research*, 45(4), 840–849. <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2019.05.007>
- Kelechi, A. H., H. Alsharif, M., Chukwudi-eke Anya, A., U. Bonet, M., Aiyudubie Uyi, S., Uthansakul, P., Nebhen, J., & A. Aly, A. (2021). Design and Implementation of a Low-Cost Portable Water Quality Monitoring System. *Computers, Materials & Continua*, 69(2), 2405–2424. <https://doi.org/10.32604/cmc.2021.018686>
- Kitchener, B. G. B., Dixon, S. D., Howarth, K. O., Parsons, A. J., Wainwright, J., Bateman, M. D., Cooper, J. R., Hargrave, G. K., Long, E. J., & Hewett, C. J. M. (2019). A low-cost bench-top research device for turbidity measurement by radially distributed illumination intensity sensing at multiple wavelengths. *HardwareX*, 5, e00052. <https://doi.org/10.1016/j.ohx.2019.e00052>
- Nuzula, N. I., Sakinah, W., & Endarko. (2017). *Manufacturing temperature and turbidity sensor based on ATmega 8535 microcontroller*. 030108. <https://doi.org/10.1063/1.4968361>
- Parra, L., Rocher, J., Escrivá, J., & Lloret, J. (2018). Design and development of low cost smart turbidity sensor for water quality monitoring in fish farms. *Aquacultural Engineering*, 81, 10–18. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2018.01.004>
- Prerana, D., Shenoy, M. R., Pal, B. P., & Gupta, B. D. (2012). Design, Analysis, and Realization of a Turbidity Sensor Based on Collection of Scattered Light by a Fiber-Optic Probe. *IEEE Sensors Journal*, 12(1), 44–50. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2011.2128306>
- Román-Herrera, C., Loza-Matovelle, D., Segura, L., & Dabirian, R. (2016). The construction of an open source based low cost turbidity sensor. *ITECKNE Innovación En Investigación En Ingeniería*, 13(1), 17–22.
- Snyder, L., Potter, J. D., & McDowell, W. H. (2018). An Evaluation of Nitrate, fDOM, and Turbidity Sensors in New Hampshire Streams. *Water Resources Research*, 54(3), 2466–2479. <https://doi.org/10.1002/2017WR020678>
- Trevathan, J., Read, W., & Schmidtke, S. (2020). Towards the Development of an Affordable and Practical Light Attenuation Turbidity Sensor for Remote Near Real-Time Aquatic Monitoring. *Sensors*, 20(7), 1993. <https://doi.org/10.3390/s20071993>
- Trevathan, J., Schmidtke, S., Read, W., Sharp, T., & Sattar, A. (2021). An IoT General-Purpose

Sensor Board for Enabling Remote Aquatic Environmental Monitoring. *Internet of Things*, 16, 100429. <https://doi.org/10.1016/j.iot.2021.100429>

Wang, Y., Rajib, S. M. S. M., Collins, C., & Grieve, B. (2018). Low-Cost Turbidity Sensor for Low-Power Wireless Monitoring of Fresh-Water Courses. *IEEE Sensors Journal*, 18(11), 4689–4696. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2018.2826778>

Wickert, A. D., Sandell, C. T., Schulz, B., & Ng, G.-H. C. (2019). Open-source Arduino-compatible data loggers designed for field research. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(4), 2065–2076. <https://doi.org/10.5194/hess-23-2065-2019>