

DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y PRUEBA PILOTO DE UN LIMNÍMETRO DIGITAL DE BAJO COSTO

DESIGN, CONSTRUCTION AND PILOT TEST OF A LOW-COST DIGITAL LIMNIMETER

Basílico Gabriel ¹

gbasilico@conicet.gov.ar

¹ Laboratorio de Biogeoquímica, Museo Argentino de Ciencias Naturales “Bernardino Rivadavia” -
Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (MACN-CONICET), Av. Ángel
Gallardo 470, CP 1405, CABA, Argentina.

Recibido 27/11/2023; Aceptado: 11/12/2023

Resumen: En Argentina, la medición del nivel del agua está limitada a escasos cuerpos de agua. Esta situación limita el alcance de los estudios hidrológicos y limnológicos. En ese marco, el desarrollo de limnómetros digitales de bajo costo puede resultar útil, no solo para la comunidad académica y los tomadores de decisión, sino también para el desarrollo de iniciativas de ciencia ciudadana. En el presente trabajo se presenta el diseño, construcción y prueba piloto de un limnómetro digital de bajo costo. El prototipo fue diseñado y construido con *hardware* y *software* de fuente abierta y otros materiales fácilmente asequibles. El equipo funcionó de manera autónoma durante 24 días, registrando el nivel del agua del embalse Ing. C. Roggero (provincia de Buenos Aires, Argentina). El costo del prototipo resultó inferior en comparación a equipos comerciales similares disponibles actualmente. La experiencia permitió identificar oportunidades para la optimización del prototipo.

Palabras-clave: Limnología; Tecnología ambiental; Prototipo; Nivel de agua.

Abstract: In Argentina, water level measurement is limited to few water bodies. This situation limits the scope of hydrological and limnological studies. In this framework, the development of low-cost digital limnimeters can be useful, not only for the academic community and decision makers, but also for the development of citizen science initiatives. This work presents the design, construction and pilot test of a low-cost digital limnimeter. The prototype was designed and built with open-source hardware and software and other readily available materials. The equipment operated autonomously for 24 days, recording the water level of the Ing. C. Roggero reservoir (Buenos Aires province, Argentina). The cost of the prototype was lower compared to similar commercial equipment currently available. The experience allowed us to identify opportunities for optimizing the prototype.

Keywords: Limnology; Environmental technology; Prototype; Water level.

1. Introducción

La medición del nivel del agua en diversos ambientes acuáticos, es fundamental en la evaluación y gestión de riesgos y en estudios hidrológicos y limnológicos. En Argentina, la información hidrológica disponible es dispersa y limitada (Troin et al., 2010); en particular, no se cuenta con información sobre caudales o altura del agua para la mayoría de los ríos y arroyos. La falta de información hidrológica o su disponibilidad limitada es una situación también observada en otros países (Alizadeh et al., 2022; Schwatke et al., 2015). Entre otras causas, esta situación frecuentemente se relaciona con el costo relativamente elevado del equipamiento necesario para la medición y registro del nivel del agua.

Las alternativas disponibles en la actualidad para la medición del nivel del agua abarcan desde tecnologías convencionales (reglas, limnógrafos mecánicos, etc.) hasta limnímetros electrónicos que transmiten la información a receptores remotos mediante radiofrecuencia, WiFi, redes de telefonía celular, entre otras. La principal ventaja de los limnímetros convencionales radica, evidentemente, en su bajo costo. Sin embargo, los limnímetros digitales permiten no solo obtener información instantánea del nivel del agua, sino también almacenarla en el propio equipo, en la Nube, o transmitirla a receptores distantes, con las ventajas de la automatización y de no requerir un operador en el territorio. Adicionalmente, los sensores DIY (*do it yourself*) de bajo costo, permiten el desarrollo de iniciativas de educación, ciencia ciudadana e investigación (Bresnahan et al., 2023).

En los últimos años se han desarrollado diversos proyectos de ciencia ciudadana que involucraron a la comunidad no-científica en el monitoreo del nivel del agua en diversos ambientes acuáticos continentales y marítimos (Fehri Khelifi y Vanclooster, 2020; Little et al., 2021; Bresnahan et al., 2023). Este enfoque tiene varias ventajas, por ejemplo, la posibilidad de obtener grandes cantidades de datos hidrológicos de múltiples ubicaciones, involucrar a la sociedad en el conocimiento y cuidado de los ambientes acuáticos y favorecer procesos de educación ambiental.

El objetivo del presente trabajo es diseñar, construir y evaluar un prototipo de limnómetro digital de bajo costo, basado en hardware y software de código abierto que permita la medición y el registro de los datos del nivel de agua de forma automatizada, y que pueda ser utilizado en iniciativas de investigación y ciencia ciudadana.

2. Metodología

2.1. Descripción del prototipo

Se diseñó un prototipo de limnómetro digital con la premisa que pudiese ser construido a un bajo costo, con materiales asequibles y utilizando *hardware* y *software* de código abierto, por cualquier persona con un conocimiento básico de electrónica y programación. La lectura de la distancia entre el limnómetro y la superficie del agua se realiza mediante un sensor que registra el tiempo que transcurre entre la emisión de una señal ultrasónica y la recepción del eco de la señal, es decir el rebote de la señal contra una superficie sólida o líquida (funcionamiento similar al de una ecosonda). Ese dato es transformado en un valor de distancia hasta el objeto que reflejó la señal, en este caso la superficie del agua. Los datos son registrados a intervalos de tiempo programables por el investigador. Posteriormente, los datos de distancia pueden ser fácilmente expresados como cotas topográficas o niveles

de agua respecto a un plano arbitrario. El prototipo fue ideado y construido durante el año 2020.

Hardware

El prototipo construido está constituido por un sensor ultrasónico HC-SR04 y un sensor de temperatura LM35, un reloj RTC (*real time clock*) DS 3231, un módulo para la lectura/escritura de una tarjeta micro-SD y una placa ARDUINO NANO para el control de los componentes electrónicos anteriores (Fig. 1). El microcontrolador ARDUINO NANO es un desarrollo de hardware libre de bajo costo, al igual que los sensores y los demás componentes electrónicos utilizados. En la Tabla 1 se indican la forma de conexión entre los componentes electrónicos (sensores, reloj RTC y módulo SD) y el microcontrolador ARDUINO NANO.

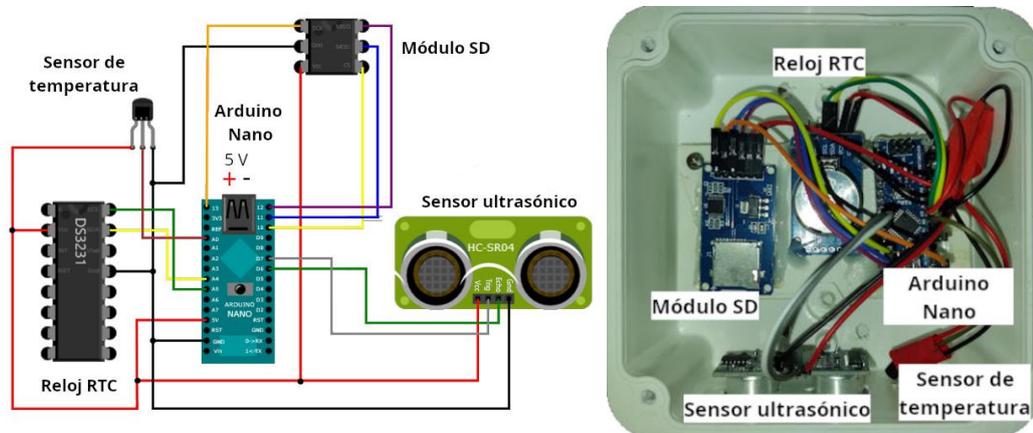


Figura 1 – Esquema (izq.) e imagen (der.) del prototipo de limnómetro digital desarrollado. Esquema elaborado mediante VIRTUAL BREADBOARD® 1.6.9 y GIMP® 2.10.34

Software

Para la programación del microcontrolador se utilizó el software ARDUINO IDE 1.8.19. Esta aplicación permite, a partir de su instalación en una notebook o PC, escribir un *sketch* que luego puede ser cargado en distintos microcontroladores ARDUINO mediante su conexión a través de un cable USB. El *sketch* elaborado puede consultarse en la sección “Material suplementario”, y consiste en una rutina de lectura de los sensores, y su registro en un archivo de texto en la tarjeta micro SD.

Cada 10’ se registraron 6 lecturas de distancia y temperatura, espaciadas cada 10”, que luego de la eliminación de valores atípicos se promediaron, obteniéndose una única lectura promedio cada 10’. Tanto la fecha y la hora como los intervalos de tiempo de medición de las variables pueden ser fácilmente corregidas o modificadas por el investigador mediante la edición del *sketch* y su nueva carga en la placa.

Tabla 1 – Conexión entre componentes electrónicos y el microcontrolador ARDUINO NANO. Los pines de conexión de cada componente electrónico se conectaron con los pines correspondientes del microcontrolador

Componente electrónico	Pin de conexión del componente	Pin de conexión ARDUINO NANO
Sensor ultrasónico HC-SR04	Gnd	Gnd
	Echo	D6
	Trig	D7
	Vcc	5 V
Sensor LM35	Izquierda (+5V)	5 V
	Centro	A0
	Derecha (Gnd)	Gnd
Reloj RTC DS 3231	SCL	A5
	SDA	A4
	Vcc	5 V
	Gnd	Gnd
Módulo adaptador micro SD	CS	D10
	SCK	D13
	MOSI	D11
	MISO	D12
	Vcc	5 V
	Gnd	Gnd

2.2. Prueba e instalación del limnómetro

El equipo desarrollado fue probado primero en condiciones de laboratorio y posteriormente fue instalado en el Embalse Ing. C. Roggero – Lago San Francisco (Moreno, provincia de Buenos Aires, Argentina) (Fig. 2). Este espejo de agua artificial tuvo origen en la construcción de la presa homónima, diseñada con el objetivo de regular el caudal del río Reconquista durante precipitaciones de gran magnitud. Actualmente, además de cumplir su función original de control hidrológico, el embalse brinda múltiples servicios ambientales como la depuración del agua y la conservación biológica, propiciando también iniciativas relacionadas con la educación ambiental, la recreación y el turismo.

Con el objetivo que el prototipo funcionara de forma totalmente autónoma, se diseñó un módulo de alimentación que consiste de un panel solar (10 W; 18,0 V; 0,56 A), un regulador de carga de batería (12/24 V; 10 A) y una batería (12 V; 1,3 Ah / 20HR). El limnómetro, la batería y el regulador de carga se montaron en dos cajas de plástico estancas y fueron adosados a una estaca de madera, la cual fue hincada en los sedimentos del embalse. La alimentación del limnómetro se realizó a través de la conexión del microcontrolador al regulador de carga, mediante un cable USB. El limnómetro diseñado funcionó de manera autónoma e ininterrumpida durante 24 días. El prototipo fue cubierto con una caja de poliestireno expandido para su protección de la radiación solar y las precipitaciones (Fig. 2).

2.3. Información meteorológica

Se realizó una búsqueda de datos pluviométricos correspondientes a la estación meteorológica más cercana con datos históricos accesibles del período bajo estudio (marzo de 2021), a fin de analizar la posible relación entre la ocurrencia de precipitaciones y el aumento de la cota de la superficie de agua en el embalse. La estación seleccionada pertenece al Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INTA) y se encuentra ubicada en la delegación INTA Castelar (Hurlingham, provincia de Buenos Aires), a 20 km de distancia al punto de instalación del limnómetro. La búsqueda de información se realizó a través de la página web del Sistema de Información y Gestión Agrometeorológica del INTA (<https://siga.inta.gob.ar/#/data>).



Figura 2 – Instalación del limnómetro en el Embalse Ing. C. Roggero – Lago San Francisco (Moreno, provincia de Buenos Aires)

3. Resultados y discusión

3.1. Información registrada

Durante los 24 días de funcionamiento continuo del equipo se registraron un total de 20741 observaciones de temperatura y 20667 de distancia. La diferencia en el número de observaciones de ambas variables se debe a errores durante la medición de distancia, pero estos representaron un porcentaje muy bajo (0.36%) en relación al número total de observaciones. Posteriormente, luego de la eliminación de valores atípicos, el número de observaciones de distancia fue de 20351. El número de valores promedio de distancia cada 10' fue de 3455, mientras que el número de valores promedio por hora fue de 577.

En la Fig. 3 se muestran los valores promedio cada 10', así como los promedios horarios y diarios de la cota del embalse Ing. C. Roggero a lo largo del período analizado (6/3/2021 al 30/3/2021). Al analizar los promedios de cotas cada 10' y 1 hora puede observarse que se registraron variaciones no atribuibles a las precipitaciones, sino al oleaje causado por el viento y la circulación de embarcaciones, así como también, posiblemente, a la interferencia de vegetación acuática, aves, etc. Considerando los promedios diarios, la cota promedio fue de 18.55 msnm, con una tendencia general de variación asociada a los eventos de precipitaciones registrados (Fig. 3). La precipitación de mayor magnitud (67.2 mm) ocurrió el 25/03/2021, mientras que cota más alta (18.78 msnm) fue registrada 3 días después de dicho evento. La cota del embalse también se incrementó en respuesta a otros eventos de precipitaciones. En todos los casos, el incremento de la cota del embalse se atribuye al incremento de los caudales de los cursos de agua afluentes al embalse.

3.2. Comparación de costos

El costo de los componentes necesarios para la construcción del limnómetro fue de aproximadamente USD 100, mientras que el módulo de alimentación tuvo un costo de USD 88 (Tabla 2). Estos costos fueron estimados a través de la página web de una plataforma internacional de compra-venta (<https://www.amazon.com/>) y corresponden a valores minoristas, por lo que el costo total del prototipo podría disminuir si se considerasen valores mayoristas.

El costo del limnómetro fue comparable al de un prototipo similar diseñado por Bresnahan et al. (2023) (~100 USD), e inferior a otros equipos ultrasónicos con funciones similares utilizados en entornos industriales, cuyos precios se ubicaron en el rango de USD 174 a +USD 1000. No obstante, cabe remarcar que no se realizó una comparación del desempeño de estos sensores comerciales con el del limnómetro diseñado en el presente trabajo.

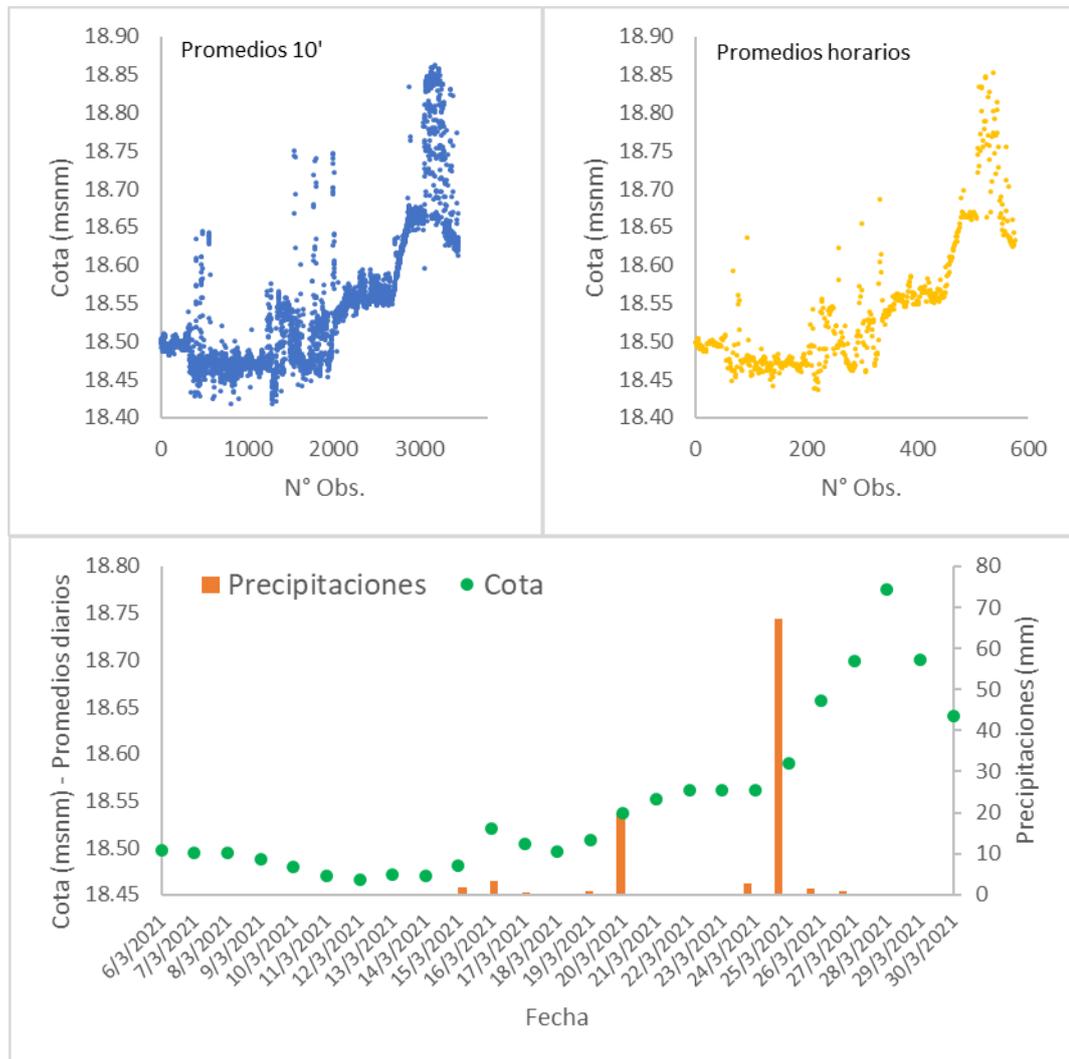


Figura 3 – Cotas del embalse Ing. C. Roggero registradas por el limnómetro entre el 6/3/2021 y el 30/3/2021. Valores promedio cada 10' (arriba, izq.), promedios horarios (arriba, der.) y promedios diarios y precipitaciones diarias correspondientes a la estación INTA Castelar (abajo)

Tabla 2 – Costo de los componentes

Componente	Precio (USD)
Limnómetro (A)	
ARDUINO NANO	18
Sensor HC-SR04	8
Sensor LM35	8
Reloj RTC DS 3231	11
Módulo adaptador micro SD	11
Tarjeta SD 64 GB	11
Caja estanca IP 67	20
Otros (cables, pila para reloj RTC, etc.)	13
Costo A	100
Módulo de alimentación (B)	
Panel solar	28
Regulador carga batería	17
Batería	20
Caja estanca IP67	23
Costo B	88
Costo total	188

3.3. Posibilidades de optimización

Existen algunos aspectos del prototipo que podrían ser mejorados en el futuro:

- ✓ Si bien la placa de desarrollo ARDUINO NANO utilizada en el prototipo puede ser reprogramada para, por ejemplo, modificar el tiempo de adquisición de datos, para ello se requiere conectar dicha placa a una PC. A fin de mejorar la interfaz de usuario, podría agregarse una pantalla led que facilite la programación de la placa sin necesidad de conexión a una PC y permita la lectura instantánea de la cota (Bresnahan et al., 2023)
- ✓ Se considera que la energía consumida por el prototipo podría reducirse, optimizando el uso de los componentes electrónicos y su configuración
- ✓ La fuente de alimentación utilizada en el prototipo incluye una batería de Pb-gel recargable mediante un panel solar y un regulador de carga, sin embargo, podrían utilizarse baterías de litio de menor tamaño y peso y con menores impactos ambientales asociados a su ciclo de vida
- ✓ El tamaño del equipo podría reducirse, en particular el del módulo de alimentación
- ✓ Podría desarrollarse un módulo para la transmisión remota de los datos. Por ejemplo, estos podrían enviarse por mensajes de texto o mediante radiofrecuencia o redes de telefonía celular
- ✓ Además de almacenarse en la tarjeta de memoria, los datos podrían ser almacenados y consultados mediante servicios en la Nube
- ✓ Podrían diseñarse accesorios para la instalación del equipo en distintos ambientes o estructuras
- ✓ En este tipo de sensores ultrasónicos, la distancia medida puede ser afectada por la temperatura del aire. La medición y el registro de la temperatura permiten compensar posibles errores en la medición de distancia debidos a cambios en la temperatura. No obstante, existen sensores de temperatura de mejor calidad.

4. Conclusión

El prototipo de limnómetro digital diseñado funcionó de manera autónoma y en condiciones reales de operación durante un período de 24 días. En ese plazo, el limnómetro permitió registrar la cota del nivel de agua del embalse Roggero, permitiendo identificar cambios en esta variable con una resolución temporal muy alta (cada 10"). A partir del análisis de los datos, se observó que el nivel del agua se modificó en concordancia con las

precipitaciones registradas en la cuenca, poniendo de relieve la utilidad del prototipo diseñado en estudios limnológicos, hidrológicos, análisis de riesgo de desastre, etc.

Agradecimientos

El autor agradece a los Sres. Ignacio Healión y Roberto Ferrer del Cuerpo Municipal de Guardaparques de la Municipalidad de Moreno, por facilitar la instalación del limnómetro.

5. Bibliografía

ALIZADEH, Bahareh, et al. Human-centered flood mapping and intelligent routing through augmenting flood gauge data with crowdsourced street photos. *Advanced Engineering Informatics*, 2022, vol. 54, p. 101730.

BRESNAHAN, Philip, et al. A low-cost, DIY ultrasonic water level sensor for education, citizen science, and research. *Oceanography*, 2023, vol. 36, no 1, p. 51-58.

FEHRI, Raed; KHLIFI, Slaheddine; VANCLOOSTER, Marnik. Testing a citizen science water monitoring approach in Tunisia. *Environmental Science & Policy*, 2020, vol. 104, p. 67-72.

LITTLE, Sarina, et al. Monitoring variations in lake water storage with satellite imagery and citizen science. *Water*, 2021, vol. 13, no 7, p. 949.

SCHWATKE, Christian, et al. DAHITI—an innovative approach for estimating water level time series over inland waters using multi-mission satellite altimetry. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2015, vol. 19, no 10, p. 4345-4364.

TROIN, Magali, et al. Hydrological modelling of a closed lake (Laguna Mar Chiquita, Argentina) in the context of 20th century climatic changes. *Journal of Hydrology*, 2010, vol. 393, no 3-4, p. 233-244.

6. Material suplementario

Sketch utilizado para la programación del limnómetro digital utilizando ARDUINO IDE 1.8.19.

```
//Carga de librerías para el control del módulo SD
#include <SPI.h>
#include <SD.h>
#define chipSelect 10
File dataFile;
```

```
//Carga de librerías para el control del reloj RTC DS 3231
#include"Wire.h"
#include "RTClib.h"
RTC_DS3231 RTC;

//Sensor de temperatura
int sensor;
float temperatura;

//Sensor ultrasónico de distancia
#define Pecho 6
#define Ptrig 7
long duracion, distancia;

void setup() {

//Iniciar comunicación serial
Serial.begin(9600);

//Iniciar reloj RTC
RTC.begin();
if(!RTC.begin()){
  Serial.println("Modulo RTC no encontrado!");
  while(1);
}

//RTC.adjust(DateTime(__DATE__, __TIME__)); //Esta línea es para ajustar fecha y hora del
módulo, la primera vez.

//Definir pines del sensor ultrasónico de distancia
pinMode(Pecho, INPUT);
pinMode(Ptrig, OUTPUT);

//Módulo SD
pinMode(chipSelect, OUTPUT);
Serial.print("Inicializando SD...");
```

```
if(!SD.begin(chipSelect)){  
  Serial.println("Fallo o tarjeta no insertada");  
  return;  
}  
Serial.println("Tarjeta SD OK");  
}  
  
void loop(){  
  
  //Leer fecha y hora  
  //Programado para leer temperatura y distancia cada 10 minutos  
  DateTime fecha = RTC.now();  
  if(fecha.minute()==  
  00|fecha.minute()==10|fecha.minute()==20|fecha.minute()==30|fecha.minute  
  ()==50){  
  
    //Leer temperatura  
    sensor = analogRead(A0);  
    temperatura = ((sensor*5000.0)/1023)/10;// Sumar o restar para calibrar LM35  
  
    //leer distancia  
    digitalWrite(Ptrig, LOW);  
    delayMicroseconds(2);  
    digitalWrite(Ptrig, HIGH);  
    delayMicroseconds(10);  
    digitalWrite(Ptrig, LOW);  
    duracion = pulseIn(Pecho, HIGH);  
    distancia = (duracion/2) / 29;  
  
    //Imprimir tarjeta  
    sdcard(); //llama a sdcard, definido más abajo  
  
    //Imprimir tiempo en el monitor serie  
    Serial.print(fecha.day(), DEC);  
    Serial.print("/");
```

```
Serial.print(fecha.month(), DEC);
Serial.print("/");
Serial.print(fecha.year(), DEC);
Serial.print(" ");
Serial.print(fecha.hour(), DEC);
Serial.print(":");
Serial.print(fecha.minute(), DEC);
Serial.print(":");
Serial.println(fecha.second(), DEC);

//Imprimir temperatura en el monitor serie
Serial.print("Temperatura: ");
Serial.print(temperatura);
Serial.println(" °C");

//Imprimir distancia en el monitor serie
if(distancia >= 500 || distancia <= 0){
  Serial.println ("Distancia: ---");
  Serial.println();
}
else{
  Serial.print("Distancia: ");
  Serial.print(distancia);
  Serial.println(" cm");
  Serial.println(" ");
}

if(distancia <= 10 && distancia >= 1){
  Serial.println("Alarma.....");
  Serial.println(" ");
}
delay(10000);
}
}
//Tarjeta SD
```

```
void sdcard(){
SD.begin(chipSelect);

//Fecha y hora
DateTime now = RTC.now();
String dataFH = "";
dataFH += String(now.day(), DEC);
dataFH += "/";
dataFH += String(now.month(), DEC);
dataFH += "/";
dataFH += String(now.year(), DEC);
dataFH += ",";
dataFH += String(now.hour(), DEC);
dataFH += ":";
dataFH += String(now.minute(), DEC);
dataFH += ":";
dataFH += String(now.second(), DEC);

//Temperatura
String dataT = "";
dataT += String("Temperatura");
dataT += ",";
dataT += String(temperatura);

//distancia
String dataD = "";
if(distancia >= 500 || distancia <= 0){
dataD += String("---");
dataD += String(" ");
}
else{
dataD += String("Distancia");
dataD += ",";
dataD += String(distancia);
dataD += ",";
}
```

```
}  
  
dataFile = SD.open("datalog.txt", FILE_WRITE);  
if(dataFile){  
  dataFile.print(",");  
  dataFile.print(dataFH);  
  dataFile.print(",");  
  dataFile.print(dataT);  
  dataFile.print(",");  
  dataFile.print(dataD);  
  dataFile.println(",");  
  dataFile.close();  
}  
else{  
  Serial.println("Error abriendo datalog.txt");  
}  
}
```