



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Diseño y construcción de un dispositivo inteligente para la separación de primeras lluvias con fines de aprovechamiento en casa habitación**

**TESIS**

Que para obtener el título de

**Ingeniero Civil**

**P R E S E N T A**

Wolfgang Antonio Resendiz Martinez

**DIRECTOR DE TESIS**

M.I. Cristian Emmanuel González  
Reyes



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2019

Dedicado especialmente a la memoria de:

Macrina, mi abuela.

Leonel, mi tío.

Nadia, mi prima.

## **Agradecimientos**

Agradezco el apoyo incondicional de mi familia: Antonio, Angélica, José Ángel y Aquilea. Porque llevo una parte de ellos en cada momento.

Al capítulo ASCE-FI UNAM, por las experiencias y las excelentes personas que conocí gracias al trabajo conjunto en los proyectos y ambiciones que compartimos; también a Josué por los consejos directos e indirectos que brindó a cada uno de los miembros de manera desinteresada y honesta.

A mi director de tesis, Cristian, por su guía y su confianza en este proyecto.

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología** y su proyecto **255273 “CASA, Prototipo de Vivienda Sustentable”** Por el apoyo económico, por la oportunidad que me brindaron al participar en este proyecto y poder desarrollar este trabajo de investigación.



## Contenido

<b>1</b>	Antecedentes del aprovechamiento pluvial .....	14
1.1.	La relación del agua y el crecimiento socioeconómico .....	14
1.1.1.	La Ciudad de México y los problemas de distribución de agua potable .....	17
1.2.	Alternativas sustentables para combatir el desabasto de agua .....	20
<b>2</b>	Marco conceptual .....	22
2.1.	Hidrología superficial .....	22
2.1.1.	Ecuación fundamental de la hidrología.....	23
2.2.	Precipitación .....	26
2.2.1.	Formación y tipos de precipitación.....	28
2.2.2.	Medidas pluviométricas.....	31
2.3.	Calidad del agua .....	34
2.3.1.	Características físicas para describir la calidad del agua.....	36
2.3.2.	Características químicas para describir la calidad del agua .....	37
2.3.1.	Normatividad.....	37
2.3.2.	Sistemas ambientales, sus cambios, interacciones e impactos sobre la calidad del agua	39
2.3.3.	Fuentes de contaminación en los sistemas de captación de agua pluvial.....	40
2.3.4.	Interdependencia entre el aire y la calidad del agua .....	41
2.3.5.	Transporte global de contaminantes.....	42
2.3.6.	Deposición seca .....	44
2.3.7.	Deposición húmeda .....	45
2.3.8.	Lluvia ácida .....	46
2.4.	Captación de agua pluvial.....	47
2.4.1.	Historia de la captación de agua pluvial.....	47
2.4.1.	Sistemas de captación de agua pluvial en la actualidad.....	48
2.5.	Los sistemas de captación de agua de lluvia.....	50
2.5.1.	Composición de los sistemas de aprovechamiento pluvial .....	52
2.6.	Separadores de primeras lluvias .....	55
2.6.1.	El fenómeno de primer flujo en tormentas urbanas y alcantarillado ( <i>first flush</i> ). 55	
2.6.2.	Primer flujo en la captación urbana de agua pluvial .....	58
2.6.3.	Tipos de separadores de primeras aguas de lluvia.....	60
2.6.4.	Sistemas húmedos y secos. ....	61
<b>3</b>	Estado del arte de los separadores de primeras lluvias .....	63
3.1.	Dispositivos separadores de primeras lluvias actuales.....	63
3.1.1.	Dispositivos comerciales al rededor.....	63
3.1.2.	Innovación de los separadores de primeras aguas .....	68
<b>4</b>	Impacto potencial de la captación de agua pluvial: caso de estudio VIS CASA .....	71

## *Antecedentes del aprovechamiento pluvial*

4.1.	Agua captada y almacenada en un año promedio.....	71
4.1.1.	Ahorro anual de agua en VIS CASA por efectos de la captación pluvial. ....	73
4.1.2.	Ahorro anual de agua en una casa promedio por efectos de la captación pluvial.....	74
<b>5</b>	<b>Dispositivo inteligente para la separación de primeras aguas de lluvia [DISPLU] ....</b>	<b>76</b>
5.1.	Antecedentes del proyecto.....	76
5.2.	Áreas de oportunidad en los dispositivos separadores de primeras lluvias actuales.....	77
5.2.1.	[DISPLU] (dispositivo inteligente para la separación de primeras lluvias).....	80
<b>6</b>	<b>Hidráulica para el diseño del DISPLU en la Ciudad de México.....</b>	<b>82</b>
6.1.	Distribución de precipitación de la región hidrológica XIII: El valle de México y sistema Cutzamala.....	84
6.1.1.	Distribución de precipitación de la Ciudad de México.....	85
6.1.2.	Tendencia de la lluvia en la Ciudad de México.....	88
6.1.3.	Intensidad y hora del día para las lluvias.....	89
6.2.	Elección de una tormenta de diseño con base en la intensidad de precipitación.....	89
6.3.	Análisis hidráulico para el diseño del DISPLU.....	91
6.3.1.	Gasto de entrada al dispositivo.....	91
6.3.2.	Gasto de salida del dispositivo.....	92
<b>7</b>	<b>Parámetros de calidad del agua para el monitoreo mediante sensores.....</b>	<b>95</b>
7.1.	Efectos de la contaminación atmosférica y la superficie de captación sobre la calidad del agua captada antes de ingresar al sistema.....	95
7.1.1.	Sensores de calidad de agua.....	99
<b>8</b>	<b>Ingeniería de diseño del dispositivo.....</b>	<b>102</b>
8.1.	Resumen de las condiciones de diseño.....	102
8.2.	Evolución del diseño conceptual del DISPLU.....	103
8.2.1.	Diseño conceptual 1.....	103
8.2.2.	Diseño conceptual 2.....	105
8.2.3.	Diseño conceptual 3.....	107
8.2.4.	Diseño conceptual 4.....	110
8.3.	Prototipo final.....	112
8.4.	Simulación del funcionamiento del DISPLU.....	115
8.1.	Metodología para la simulación del funcionamiento.....	115
8.1.1.	Simulación con electroválvula de 1/2 “.....	116
8.1.2.	Simulación con electroválvula de 3/4”.....	118
8.1.3.	Simulación con electroválvula de 1”.....	119
8.1.4.	Simulación con electroválvula de 1 1/2”.....	121
<b>9</b>	<b>Electrónica del prototipo.....</b>	<b>123</b>
9.1.	Desarrollo de prototipos con microcontroladores comerciales.....	123
9.1.1.	Computadoras y microcontroladores.....	123
9.1.2.	Arduino UNO.....	124
9.1.3.	ESP32.....	127
9.2.	Componentes utilizados en el prototipo.....	130

## *Antecedentes del aprovechamiento pluvial*

9.2.1.	Módulo RTC (DS1307) .....	130
9.2.2.	Sensor de nivel de líquidos (FS-IR02).....	131
9.2.3.	Electrodo industrial de pH (SKU: FIT0348).....	132
9.2.4.	Sensor de turbiedad SEN0189 .....	134
9.2.5.	Sensor de temperatura (Dallas DS18B20).....	136
9.2.6.	Relevador de 10A .....	137
9.2.7.	Módulo MH-SD .....	138
9.2.8.	Convertidor lógico bidireccional. ....	138
9.2.9.	Válvula de bola motorizada (USS-MSV00017) .....	139
9.3.	Diagramas electrónicos.....	140
9.4.	Parte lógica del separador (software) .....	142
<b>10</b>	<b>Manufactura e instalación .....</b>	<b>143</b>
10.1.	Reserva fotográfica del proceso de construcción.....	145
<b>11</b>	<b>Conclusiones .....</b>	<b>152</b>
<b>12</b>	<b>Anexos.....</b>	<b>153</b>
12.1.	Planos .....	153
12.2.	Código Arduino.....	180
12.3.	Código ESP32 .....	184
<b>13</b>	<b>Bibliografía .....</b>	<b>187</b>

## Índice de Figuras.

Figura 1-1 Sistema de acueductos alrededor de Lyon. ....	14
Figura 1-2 Impactos económicos anuales de los desastres 2000-2016 en millones de pesos (precios corrientes). Datos recuperados de (CENAPRED, 2017) .....	16
Figura 1-3 Destino final del agua extraída por medio pozos en la CDMX. Adaptado de (Legorreta, 2006) .....	17
Figura 1-4 Modelo de la gestión del agua en la Ciudad de México. Adaptado de (Burns, 2009) .....	18
Figura 1-5 Gráfica de hundimientos promedio en el centro histórico de la CDMX. Se puede observar que hacia los años 50, los hundimientos aceleraron de manera exagerada (Marsal y Masari, 1983) .....	19
Figura 2-1 Diagrama del ciclo hidrológico. Adaptado de (Sáenz, 1999) .....	24
Figura 2-2 Modelo teórico de la superficie de captación. Adaptado de (Sáenz, 1999).....	25
Figura 2-3 Esquema de balance hídrico Adaptado de (Sáenz, 1999).....	25
Figura 2-4 Corte vertical de un ciclón. Adaptado de (Sáenz, 1999) .....	30
Figura 2-5 Frente frío y cálido. Adaptado de (Sáenz, 1999).....	31
Figura 2-6 Registro pluviográfico en una carta de duración diaria (Elaboración propia).....	32
Figura 2-7 Relación de la contaminación entre los sistemas ecológicos económicamente más importantes. Adaptado de (Novotny & Olem, 1994) .....	39
Figura 2-8 Interacción física y química de los procesos entre agua-atmósfera. Fuente: adaptado de (Novotny & Olem, 1994) .....	42
Figura 2-9 Fuentes locales y globales de la deposición atmosférica Fuente: adaptado de (Novotny & Olem, 1994).....	44
Figura 2-10 Esquema arquitectónico de las casas romanas que contaban con un sistema de captación de agua de lluvia (Litaudon, 2002). .....	47
Figura 2-11. Chultun maya, depósito subterráneo impermeabilizado con yeso para almacenar agua de lluvia (Gould y Nissen-Petersen, 1999) .....	48
Figura 2-12 Clasificación general del aprovechamiento de agua de lluvia (Gould y Nissen-Petersen,1999) .....	50
Figura 2-13 El principio general de la captación y utilización de agua pluvial. Adaptado de: (Roebuck, 2007) .....	51
Figura 2-14 Esquema de la captación de agua de lluvia. Fuente: adaptado de (Roebuck, 2007) .....	52
Figura 2-15 Canaletas con rejillas (CONAFOVI, 2005). .....	54
Figura 2-16 Distintos tipos de filtros para hojas. a) por caída vertical b) por centrifugado. Tomado de (Gould y Nissen-Pattersen,1999) .....	55
Figura 2-17 Gráfica M(V), descarga acumulada contra volumen total (Saget, Chebbo, & Bertrand-Krajewski, 1996).....	57
Figura 2-18 Flujo de materia a través de un sistema de separación de primeras lluvias.....	58
Figura 2-19 Funcionamiento básico de un separador de primeras aguas de lluvia. Adaptado de (Belmeziti, 2012) .....	60

## Antecedentes del aprovechamiento pluvial

Figura 2-20 Tipos de separadores de primeras aguas de lluvia actuales. Adaptado de (Belmeziti, 2012) .....	61
Figura 2-21 Sistemas húmedo y seco. Adaptado de (ATA, 2010) .....	62
Figura 3-1 Separadores de lluvia automáticos planteados por Gould y Nissen-Petersen.....	68
Figura 3-2 A) Dispositivo construido y analizado por García Velázquez y basado en la propuesta de la UNATSABAR en 2001 B) Dispositivo construido y analizado por García Velázquez y basado en la propuesta de Isla Urbana C) Dispositivo propuesto, construido y analizado por García Velázquez .....	69
Figura 4-1 Agua captada por el sistema, comparada contra el consumo del WC. ....	72
Figura 4-2 Volumen bruto que es posible almacenar a lo largo de un año .....	73
Figura 4-3 comportamiento del sistema con un volumen de almacenamiento de 300 litros .....	73
Figura 4-4 Ahorro de agua en un año por el sistema de captación (VIS CASA).....	74
Figura 4-5 Ahorro de agua debido al sistema de captación de lluvia (Casa promedio).....	75
Figura 5-1 Curvas de eficiencia de remoción vs eficiencia volumétrica (Martinson & Thomas, 2009) .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Figura 5-2 Diseño óptimo de separadores por intercepción (Martinson & Thomas, 2009). <b>¡Error! Marcador no definido.</b>	
Figura 5-3 En azul, tipo de lavado de contaminantes que no consideran las teorías de primer flujo (Saget, Chebbo, & Bertrand-Krajewski, 1996).....	80
Figura 6-1 Región Hidrológico-Administrativa XIII. Adaptado de (Hernández-Suárez, 2011)....	84
Figura 6-2 Mapa de isoyetas de la distribución de la precipitación media anual. (Maderey-R., 1980) .....	85
Figura 6-3 Precipitación media mensual de la región hidrológica XIII (Aquino Martínez, 2012)	86
Figura 6-4 Percentil 95% de la precipitación diaria en 24 horas (1979-2003) (Aquino Martínez, 2012) .....	87
Figura 6-5 Histograma de frecuencia de los eventos de precipitación anuales normalizados para la estación 9020, con datos completados de las estaciones 9008 y 9024.....	87
Figura 6-6 Precipitación diaria acumulada (1877-2007) (Aquino Martínez, 2012).....	88
Figura 6-7 Frecuencia en el ciclo de intensidades de los eventos de tormenta entre 2003 y 2006 (Aquino Martínez, 2012) .....	89
Figura 6-8 Precipitación Máxima Promedio anual en 60 min (Maderey-R., 1980) .....	90
Figura 6-9 Gráfica intensidad contra gasto asociado. Se describe el comportamiento del gasto en distintas posibilidades de área de captación.....	92
Figura 6-10 Esquema válvula de bola (Válvulas Industriales S.A., 2018).....	93
Figura 6-11 Relación H/Q de para distintos diámetros de salida.....	94
Figura 7-1 Promedio del pH (A) y la conductividad (B) para los eventos medidos en el modelo piloto. ■ Calidad de las primeras aguas separadas. ■ Calidad del agua en el tanque de almacenamiento. — — Muestras del ambiente (sin pasar por una superficie). .....	97
Figura 7-2 Promedio del Turbidez (UTN) (A) y la Solidos suspendidos (B) para los eventos medidos en el modelo piloto. ■ Calidad de las primeras aguas separadas. ■ Calidad del agua en el tanque de almacenamiento. — — Muestras del ambiente (sin pasar por una superficie). .....	97
Figura 8-1 Diagrama de flujo con el que se inició el proceso de diseño. ....	103
Figura 8-2 Primer diseño conceptual del DISPLU .....	104

## *Antecedentes del aprovechamiento pluvial*

Figura 8-3 Diagrama de flujo adaptado al funcionamiento del primer diseño conceptual.....	105
Figura 8-4 Segundo diseño conceptual del DISPLU.....	106
Figura 8-5 Diagrama de flujo del funcionamiento del dispositivo conceptual.....	107
Figura 8-6 Tercer diseño conceptual del DISPLU.....	108
Figura 8-7 Cuarto diseño conceptual del DISPLU.....	110
Figura 8-8 Esquema del DISPLU para modelar las entradas y salidas.....	115
Figura 8-9 Comportamiento del volumen de agua dentro del DISPLU en función del gasto de entrada y el tiempo.....	116
Figura 8-10 Proyeccion en (XY) del comportamiento del displu.....	117
Figura 8-11 Límites de área de captación e intensidad de lluvia.....	117
Figura 8-12 Comportamiento del Volumen de agua dentro del DISPLU en función del gasto de entrada y el tiempo para electroválvula de 3/4".....	118
Figura 8-13 Proyeccion en (XY) del comportamiento del displu con una electroválvula de 3/4".....	118
Figura 8-14 Límites de área de captación e intensidad de lluvia del DISPLU para una electroválvula de 3/4".....	119
Figura 8-15 Comportamiento del Volumen de agua dentro del DISPLU en función del gasto de entrada y el tiempo para electroválvula de 1".....	119
Figura 8-16 Límites de área de captación e intensidad de lluvia del DISPLU para una electroválvula de 1".....	120
Figura 8-17 Proyeccion en (XY) del comportamiento del DISPLU con una electroválvula de 1".....	120
Figura 8-18 comportamiento del Volumen de agua dentro del DISPLU en función del gasto de entrada y el tiempo para electroválvula de 1 1/2".....	121
Figura 8-19 Proyeccion en (XY) del comportamiento del DISPLU con una electroválvula de 1 1/2".....	121
Figura 8-20 Límites de área de captación e intensidad de lluvia del DISPLU para una electroválvula de 1 1/2".....	122
Figura 9-1 Desglose de pines de la placa Arduino UNO y el microcontrolador AtMega328 (pighixxx.com, 2013).....	126
Figura 9-2 Diagrama de capacidades y características del SoC ESP32 (Llamas, 2018).....	127
Figura 9-3 Desglose de pines de la placa DOIT DEVKIT V1 (playelek.com, 2016).....	129
Figura 9-4 Módulo RTC DS1307, a la derecha se muestra una fotografía del módulo, a la izquierda el circuito común de operación del módulo (Dallas Semiconductor, 2008)......	130
Figura 9-5 Sensor de nivel FS-IR02.....	131
Figura 9-6 Circuito de la placa de conversión (conexión).....	131
Figura 9-7 Placa de conversión del FS-IR02.....	131
Figura 9-8 Medidas del sensor.....	131
Figura 9-9 Fotografías del electrodo de pH FIT0348(derecha) y la placa de conversión (izquierda) (DFRobot, 2018c)......	132
Figura 9-10 Medidas del electrodo.....	132
Figura 9-11 Placa de conversión/conexión (pHmeter V1.0) (DFRobot, 2018c).....	133
Figura 9-12 Circuito de la placa de conversión (DFRobot, 2018c).....	133

Figura 9-13 Fotografías del sensor de turbiedad SEN189(derecha) y la placa de conversión (izquierda) (DFRobot, 2018d).....	134
Figura 9-14 Circuito de la placa de conversión de la placa de turbidez (DFRobot, 2018d). ....	135
Figura 9-15 Relación entre la turbiedad y el voltaje (DFRobot, 2018d). ....	135
Figura 9-16 Fotografía del sensor de temperatura DS18B20 (derecha) y la placa de conversión (izquierda) (DFRobot, 2018e).....	136
Figura 9-17 Esquema del DS18B20 (DFRobot, 2018e) .....	136
Figura 9-18 Fotografía del módulo del relevador de 10A (DFRobot, 2018f).....	137
Figura 9-19 Esquema de conexiones del módulo de relevador (DFRobot, 2018f) .....	137
Figura 9-20 Fotografía del módulo MH-SD. ....	138
Figura 9-21 Fotografía del convertidor lógico (izquierda) y diagrama electrónico del mismo (derecha) (Sparkfun, 2018c) .....	138
Figura 9-22 Esquema de conexión del convertidor lógico bidireccional (Sparkfun, 2018c).....	138
Figura 9-23 Fotografías de la Valvula <i>USS-MSV00017</i> (U.S. Solid, 2018) .....	139
Figura 9-24 Esquema de conexiones de los componentes electrónicos .....	140
Figura 9-25 Fotografía de las conexiones .....	140
Figura 9-26 Diagrama esquemático de los componentes y sus conexiones .....	141
Figura 10-1 Hoja de acrílico y sus respectivos cortes .....	144
Figura 10-2 Fotografía de las piezas cortadas. En verde su nomenclatura basada en el plano 2/32 .....	145
Figura 10-3 Piezas 14,17,18 y 20 ensambladas.....	146
Figura 10-4 proceso constructivo: las láminas cortadas de acrílico se cementaron por partes; dejando unos diez minutos para el fraguado del pegamento; después de este periodo la unión es lo suficientemente rígida como para soportar su manipulación .....	146
Figura 10-5 Sensor de temperatura adaptado .....	147
Figura 10-6 Ensamble de los adaptadores Macho de 1" a las piezas de acrílico.....	147
Figura 10-7 Sensor de pH adaptado.....	148
Figura 10-8 Sensor de Turbidez adaptado .....	148
Figura 10-9 Vista del Displu ensamblado .....	149
Figura 10-10 Vista del DISPLU ensamblado .....	149
Figura 10-11 Esquema de la trampa de arenas .....	150
Figura 10-12 DISPLU instalado .....	151

## Índice de tablas

Tabla 2-1 Parámetros de calidad del agua potable. Elaboración con datos de: (EPA, 2009), (Health Canada, 2017), (NOM-127-SSA1-1994), (OMS, 2006) .....	38
Tabla 3-1 Comparación de los dispositivos de separación de primeras aguas de lluvia (García Velázquez, 2012). .....	70
Tabla 5-1 Tabla de decisión para comprar los productos de Isla Urbana.....	79
Tabla -6-1 Estudios hidrológicos de proyectos de propósito múltiple.....	83
Tabla 6-2 Medidas internas y externas de las válvulas de bola recuperado de : (Válvulas Industriales S.A., 2018) .....	93
Tabla 7-1 Datos de calidad del agua a 13 muestras de distintas tormentas que escurrieron sobre la misma superficie de captación (García Villegas, 2013).....	96
Tabla 7-2 Calidad del agua en el sistema de separación de primeras aguas, esta calidad se toma de agua que no entra al sistema, es decir, es agua separada (Sánchez, Cohim, & Kalid, 2015)..	98
Tabla 7-3 Calidad del agua después del sistema de separación de primeras aguas, esta calidad entra al sistema (Sánchez, Cohim, & Kalid, 2015).....	98
Tabla 7-4 Rango de calidad del agua que podría encontrarse después del separado.....	98
Tabla 7-5 Algunos sensores de calidad de agua en el mercado.....	101
Tabla 8-1 Resumen de rangos clave para iniciar el diseño de un dispositivo.....	102
Tabla 9-1 Características del chip ATmega328. Extraído (Wikipedia, 2018) .....	124

## **Justificación**

La especie humana, utilizando la razón como base, la tecnología como un medio, el bienestar social como fin y el sistema económico como un catalizador, ha alcanzado niveles sin precedentes en la transformación del planeta tierra.

El proceso de industrialización masiva, cuyos inicios se ubican en el siglo XVIII; remoto a escala humana, pero reciente para nuestro planeta; trajo consigo beneficios económicos inmediatos. Pero no es hasta finales del siglo pasado en los que se empiezan a vislumbrar los efectos indeseables que la revolución de la industria, la era del consumo y el surgimiento de grandes urbes acarrearía consigo.

Uno de estos nuevos efectos, pero cada vez más evidente en la Ciudad de México es el déficit en el suministro de agua potable. Las soluciones clásicas al problema van encaminadas casi siempre a la mejora de eficiencia de la red y a la construcción de nueva infraestructura de captación. Estas soluciones tienden a corregir problemas que se presentan en la red de suministro, sin embargo, por sí mismas no fomentan un ahorro del recurso y tienden a propiciar entre los beneficiarios la idea falsa de que las fuentes de abastecimiento son un recurso ilimitado; lo anterior abre un área de oportunidad a la captación doméstica de agua pluvial como una solución parcial al problema de abastecimiento en áreas urbanas.

Un sistema de captación de lluvia a una escala doméstica comienza desde el área de captación y el sistema de tuberías que permiten almacenar el agua; este proceso trae consigo algunos problemas y por lo tanto es susceptible a perfeccionarse. Este trabajo forma parte de la línea de investigación y uno de los trabajos bajo la asesoría del profesor Cristian Gonzales Reyes. Tiene la intención de buscar la manera de separar el agua de lluvia, que por malas condiciones ambientales o contaminantes en el área de captación presenta una calidad inferior a la utilizable para fines antropológicos. Si bien ya existen dispositivos que intentan separar las primeras lluvias, no lo hacen con base en el análisis de la calidad del agua y su capacidad de adaptación a la superficie de captación es limitada. La inspiración fundamental de este trabajo es hacer más eficiente este proceso.

## **Objetivo:**

- Diseñar y construir un dispositivo inteligente que mediante el monitoreo constante de características de calidad del agua separe las primeras lluvias captadas en azoteas, con fines de aprovechamiento en casa habitación.

## **Objetivos particulares**

- Definir las condiciones de diseño del dispositivo para satisfacer las necesidades de una casa habitación promedio.
- Establecer los parámetros que definirán la calidad del agua de lluvia y que pueden utilizarse para la separación.
- De cada parámetro de calidad del agua a considerar, identificar los sensores disponibles en el mercado y que mejor se adapten a las condiciones del prototipo.
- Definir los límites mínimos de calidad de agua pluvial que dictaminan la operación del dispositivo.
- Proponer, a nivel conceptual, distintas alternativas de prototipos capaces de monitorear en tiempo real si el agua captada cuenta con la calidad aceptable para ser aprovechada.
- Elegir una alternativa de prototipo óptimo considerando criterios técnicos y económicos.
- Diseñar y construir la alternativa de dispositivo más conveniente.
- Verificar el funcionamiento óptimo del sistema y, en su caso, calibrar los sensores utilizados.
- Definir los beneficios económicos y de ahorro en el consumo de agua de la red de distribución por la implementación de un sistema de aprovechamiento de agua pluvial en el proyecto VIS CASA.

## Alcances y limitaciones

Los alcances de este trabajo, acorde a los objetivos planteados, se pueden resumir en la construcción de un dispositivo funcional. Es preciso aclarar que el proceso de construcción implica un análisis previo de las condiciones a las que estará sometido el dispositivo, en segundo lugar involucra el establecimiento de sus características y las mejoras que tendrá con respecto a los sistemas de separación actuales; como último paso hacia la manufactura serán necesarios planos y descripciones precisas; esto último con la finalidad de hacer más sencillo el montaje y como una guía en caso de querer replicar o mejorar el dispositivo en un futuro.

Dado que los parámetros de diseño del **D**ispositivo inteligente para la **s**eparación de **p**rimeras **l**luvias (en adelante DISPLU, considerando las primeras letras del su nombre en extenso) estarán tomadas de las condiciones comunes de una casa habitación promedio en la Ciudad de México, la superficie de captación (y por lo tanto el gasto con el que funcionará) también están ligados a este entorno. También es importante aclarar que se diseña este sistema como un primer paso hacia la mejora de la calidad del agua de lluvia captada, por lo que después del proceso no se espera agua potable que cumpla con la normativa vigente (NOM-127-SSA1-1994) tampoco se realizará un análisis exhaustivo de los resultados que surjan de la operación del equipo, lo cual se sugiere para trabajos consecuentes.

# 1 Antecedentes del aprovechamiento pluvial

“Son las aguas las que hacen la ciudad”  
Plinio el Viejo

## 1.1. La relación del agua y el crecimiento socioeconómico

Se da por hecho la relación que tiene el agua como sustancia base para el sustento de cualquier ecosistema sobre la tierra, pero se escapa a primera vista la estrecha relación que tiene el agua como llave para el progreso social y económico de las poblaciones humanas.

Es sensato pensar que el suministro urbano de agua debe ser tomado como una estrategia que considere que los recursos están interrelacionados y que los humanos dependen de ellos para lograr su desarrollo (Parra, 2015). Esta correlación no es contemporánea, y mucho menos propia del sistema económico actual; un ejemplo de ello es que la ciudad de *Lyon*, fundada en el 43 a.C. por el imperio romano, se percató de la importancia del agua como el instrumento más importante para el desarrollo económico y social. A medida que la ciudad crecía, el suministro de agua tomó una importancia proporcional a su crecimiento poblacional; y fue sólo gracias a la comprensión que los ingenieros romanos tenían sobre comportamiento hidráulico que pudieron resolver en gran medida su abastecimiento en virtud de 4 grandes acueductos (Figura 1-1) (Litaudon, 2002). Demostrándose a sí mismos que el ser humano podía llegar a ejercer soberanía sobre la naturaleza. Muchos años más tarde nos daríamos cuenta (como humanidad) que esa soberanía no es más que una ilusión. pues, aunque el agua es un recurso renovable, su disponibilidad está limitada a factores geográficos, meteorológicos y tecnológicos.

En las economías actuales, el agua es esencial para crear y apoyar el empleo tanto directo como indirecto.<sup>1</sup> La mitad de la fuerza laboral del planeta trabaja en ocho sectores económicos que dependen directamente de los recursos naturales: agricultura, silvicultura, pesca, energía, reciclaje,

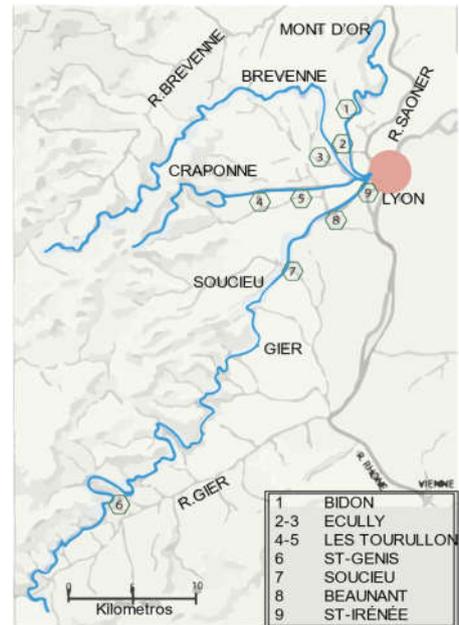


Figura 1-1 Sistema de acueductos alrededor de Lyon.

El sistema de abastecimiento fue ampliado en tanto la población crecía.

Los empleos directos son el resultado de la inversión en cualquier sector económico determinado.

Se crean puestos de trabajo indirectos cuando una inversión en un sector conlleva un aumento del número de puestos de trabajo de los proveedores y distribuidores de ese sector<sup>1</sup>

construcción y transporte. Asimismo, el ingreso de más de mil millones de personas depende sólo de los sectores de la pesca, la agricultura y la silvicultura; que objetivamente son los sectores más amenazados por la problemática en el suministro de agua dulce (International Labour Conference, 2013).

La *International Labour Conference* declara una terminología que identifica los empleos que dependen del agua en función del papel que tomen los recursos hídricos en el proceso productivo de las actividades que dan origen a dichos empleos. Bajo esta declaración, **los empleos de agua** son aquellos que incluyen puestos de trabajo tales como la gestión integral de los recursos hídricos, la construcción y gestión de infraestructura del agua, la prestación de servicios relacionados con el agua, que incluye: el suministro de agua; el alcantarillado, la gestión de residuos y actividades de rehabilitación de ecosistemas. Los empleos de agua son fundamentales para que los sectores que dependen del agua y, por lo tanto, todos los empleos que dependen de ella puedan mantenerse y desarrollarse.

Los **empleos que dependen del agua** suelen ir en correspondencia con el grado de requerimiento hídrico que tengan los sectores económicos de los que son parte: ya sea una dependencia **fuerte o moderada**. Los empleos de **dependencia fuerte** son aquellos que requieren una cantidad inmensa de agua como insumo para realizar sus actividades o procesos de producción: agricultura, silvicultura, pesca continental, acuicultura, minería, la mayoría de los tipos de generación de energía, así como diversos puestos en las industrias manufactureras y de transformación. Otros empleos que dependen fuertemente del agua incluyen puestos de trabajo en el cuidado de la salud, el turismo y la gestión de los ecosistemas (Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas, 2016).

Los **empleos** que son **moderadamente dependientes** del agua se definen como aquellos que no requieren un acceso a cantidades grandes de la misma para realizar la mayor parte de sus actividades, pero para los cuales el agua es, sin embargo, un componente necesario en alguna que otra parte de sus cadenas de valor. Los ejemplos de sectores con empleos moderadamente dependientes del agua incluyen la construcción, el ocio, el transporte (con exclusión de la navegación interior, que depende fuertemente del agua) y las industrias manufactureras/ de transformación, tales como la madera, el papel, el caucho/plástico y metales, así como algunos tipos específicos de puestos de trabajo en el sector de la educación (Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas, 2016).

Como tal, se calcula que el 95% de los empleos en el sector de la agricultura, el 30% de los empleos en el sector de la industria y el 10% de los empleos en el sector servicios dependen fuertemente del agua. También se estima que el 5% de los empleos en el sector de la agricultura, el 60% de los empleos en el sector de la industria y el 30% de los empleos en el sector servicios dependen moderadamente del agua. En esencia, esto significa que el 78% de los puestos de trabajo que constituyen la fuerza laboral mundial dependen del agua (Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas, 2016).

Se han hecho estudios que concluyen que un suministro adecuado de agua, saneamiento e higiene en el hogar y trabajo influyen directamente en la productividad de las personas, alcanzando relaciones *costo-beneficio* tan sorprendentes como que, por cada peso invertido en sanidad el beneficio se multiplica hasta siete veces (OECD Studies on Water, 2011). Las dinámicas entre el agua y el empleo son muy complejas y dependientes de las circunstancias específicas de cada región; y aún

## Antecedentes del aprovechamiento pluvial

bajo esas circunstancias hay un consenso al afirmar que una gobernabilidad pública sólida, junto con inversión pública y privada en la gestión de los recursos hídricos, la infraestructura y los servicios del agua pueden generar y apoyar el empleo en todos los sectores de la economía (Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas, 2016).

Los países tienen una fuerte correlación entre las inversiones relacionadas con el agua y el ingreso nacional, así como entre la capacidad de almacenamiento hídrico y el crecimiento económico (Sadoff, y otros, 2015). Por el contrario, una inversión insuficiente en estos aspectos puede conllevar impactos económicos negativos muy grandes. Por ejemplo, las inundaciones en el año 2011 en Tailandia afectaron las principales industrias del país: automotriz y electrónica; lo que se reflejó en una fuerte afectación para la economía de Tailandia (Haraguchi & Lall, 2014).

México no escapa de este tipo de eventos, y cada año se pierden millones de pesos en daños ocasionados por un manejo deficiente de los recursos hídricos. Para ejemplificar esta situación se han de tener en cuenta datos oficiales del Centro Nacional de Prevención de Desastres; que nos proporciona un registro del impacto económico de desastres ocasionados por fenómenos geológicos, hidrometeorológicos, sanitarios, socio-organizacionales y químicos. Trabajando los datos podemos ver cuál es el impacto económico que ocasionan los desastres que involucran directamente al manejo e infraestructura del agua: derrumbes por lluvias, tormentas severas, inundaciones, lluvias, mareas de tormenta, sequías, desertificación, erosión e interrupción de los servicios sanitarios y de abastecimiento.

Durante el periodo 2000–2015, México acumuló daños por los desastres relacionados con el agua que ascienden a 151 152 millones de pesos, que vistos en perspectiva simbolizan el 37% de los daños relacionados por desastres dentro de este periodo. La figura 1-2 desglosa esta información año con año. Es de interés observar que hay años en los que las pérdidas causadas por el manejo e infraestructura hídrica tienen una relevancia muy grande, y otros en las que pareciera que no existe una repercusión importante, esto puede atribuirse a la aleatoriedad de

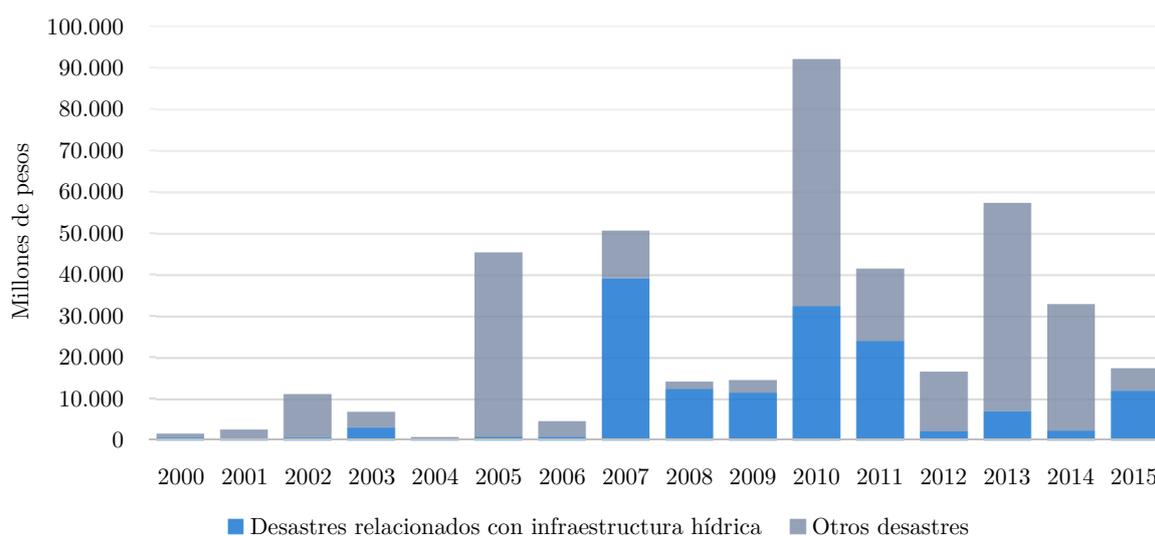


Figura 1-2 Impactos económicos anuales de los desastres 2000-2016 en millones de pesos (precios corrientes). Datos recuperados de (CENAPRED, 2017)

Actualmente las áreas urbanas representan un 3% del área terrestre, (Liu, He, Zhou, & Wu, 2014), por otro lado el consumo de agua ha doblado la proporción de crecimiento poblacional de estas; considerando que hoy en día el 55% de la población habita en zonas urbanas y previendo que este porcentaje llegue a 65% para 2050 (FAO, 2017), es de esperar que el incremento en el consumo de agua aumente en una proporción similar.

### 1.1.1. La Ciudad de México y los problemas de distribución de agua potable

Un ejemplo adicional de la importancia del agua en el desarrollo económico y social, más cercano al entorno en el que se desarrolla este trabajo, es la antigua urbe sobre la que se construyó la actual Ciudad de México.

Resulta increíble pensar que hacia 1519, al llegar a la cuenca de México, los conquistadores españoles encabezados por Hernán Cortés vislumbraran desde lejos el gran lago de Texcoco en cuyo centro se alojaba la capital del Reino Azteca: la ciudad de Tenochtitlán. Las obras hidráulicas que mantenían a esa ciudad no se limitaban al abastecimiento de agua, iban más allá, tanto que por sí misma era una ciudad intrínsecamente acuática (Legorreta, 2006).

Desde que Tenochtitlan fue fundada, tuvo serios problemas para la obtención de agua potable, pues al ser establecida sobre un lago de alta salinidad, el suministro de agua potable nunca fue tan sencillo como simplemente extraer agua del lago sobre el que residían, de hecho, una de las fuentes más importantes de agua fueron los manantiales de Chapultepec, desde los cuales se construyó un inmenso acueducto sobre el lago durante los tiempos del tercer señor de Tenochtitlan, Chimalpopoca. Obra diseñada por Nezahualcōyotl y terminada alrededor de 1466; contaba con dos canales sobre un terraplén y una longitud aproximada de 5 kilómetros. Este acueducto cumplió la demanda de la población Mexica hasta que eventualmente, el crecimiento de sus límites debido a la conquista provocó que se construyeran más obras de abastecimiento; en orden cronológico entre 1564 y 1572 se construyó el acueducto desde Santa Fe, a principios del siglo XVII se construyó otro desde Chapultepec hasta salto del agua.

Una obra que marcó el inicio de una serie de situaciones cada vez más comprometedoras para el equilibrio ecológico de la ciudad fue la apertura del socavón de Nochistongo iniciada en 1607 y convertida en un tajo años más tarde; aunque no es una obra de abastecimiento, sino de desagüe, fue en este momento que se puso fin a la condición de cuenca cerrada del Valle de México. Desde entonces, las aguas del río Cuautitlán y de la laguna de Zumpango comenzaron a ser expulsadas del valle de Anáhuac. Obras de este estilo terminaron por modificar el paisaje original de la cuenca y las aguas superficiales cada vez son más escasas.

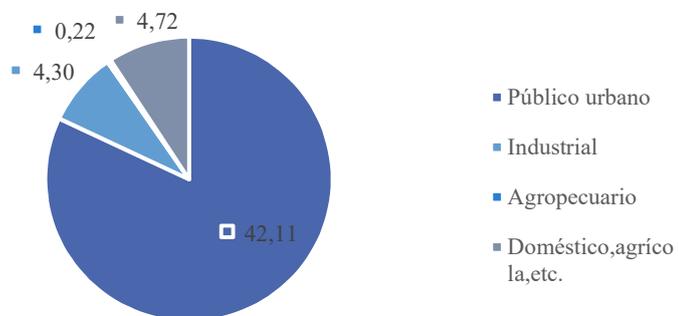


Figura 1-3 Destino final del agua extraída por medio pozos en la CDMX. Adaptado de (Legorreta, 2006)

## Antecedentes del aprovechamiento pluvial

En 2015, la Ciudad de México tenía una población de cerca de 9 millones de habitantes (INEGI, 2015) asentados en 1600 kilómetros cuadrados y consumía uno de los caudales más grandes para una ciudad en el mundo (Legorreta, 2006), cerca de  $72 \text{ m}^3/\text{s}$ , de los cuales el 65% se extraen por medio de cerca de 3000 pozos, el 26.5% ( $20.3 \text{ m}^3/\text{s}$ ) proviene del Sistema Lerma y de Cutzamala, y sólo el 1.7% ( $1.2 \text{ m}^3/\text{s}$ ) de presas y ríos localizadas en el Valle de México.

Puede observarse que la extracción de agua de los pozos es muy alta; y supera por mucho la extracción sustentable que se recomienda para la zona, que es la velocidad a la que se recarga el manto acuífero, rondando  $19 \text{ m}^3/\text{s}$ . Un modelo completo de la gestión que existe en la Ciudad de México es mostrado en la figura 1-4.

El impacto ambiental que este suministro de agua ejerce sobre la Cuenca de México llega a ser claro cuando se tienen en cuenta algunos indicios. Principalmente se han estudiado los efectos de la extracción de agua en pozos en el abatimiento de los niveles de agua, de hecho, las primeras sospechas de este fenómeno se dieron a causa de la extinción de muchos de los manantiales que se

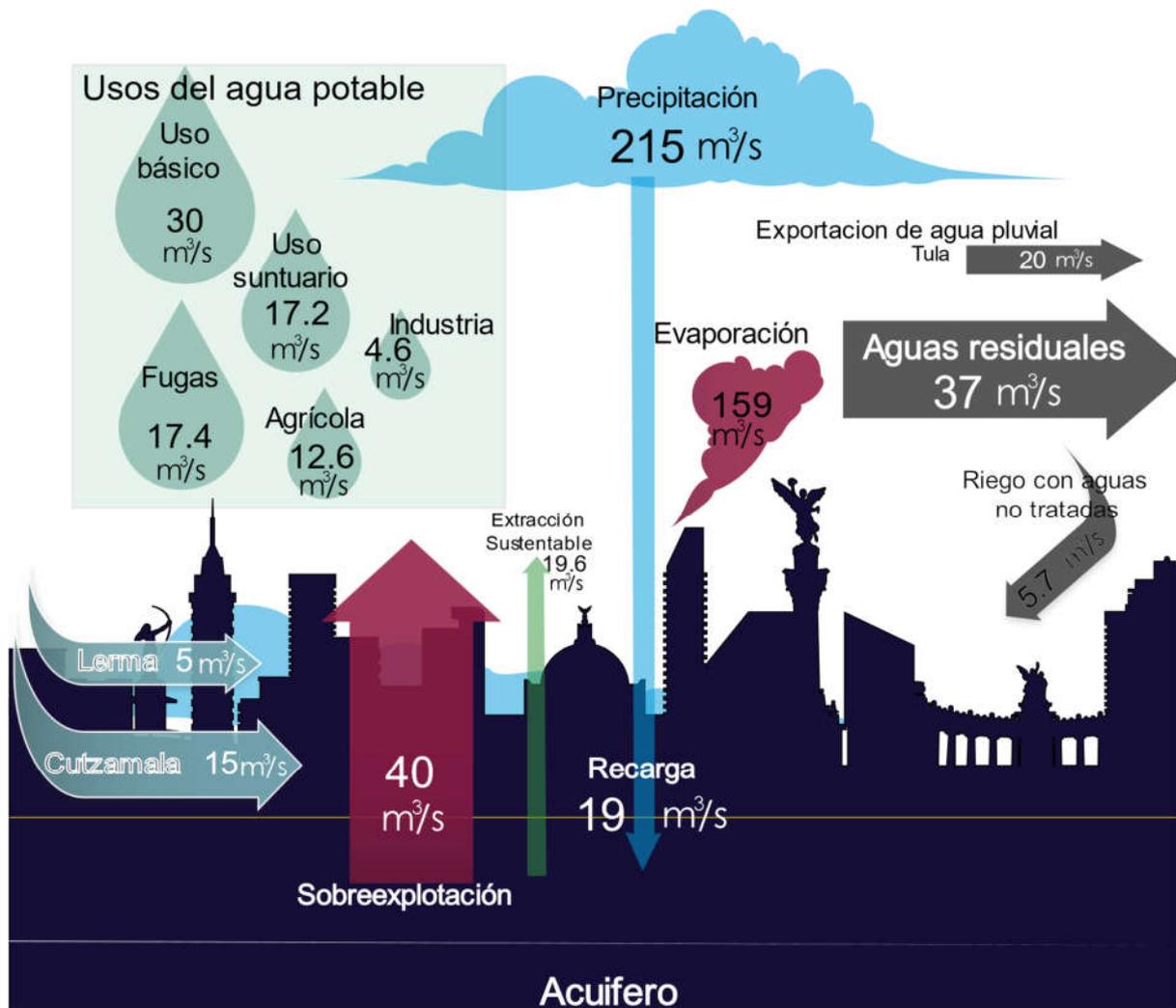


Figura 1-4 Modelo de la gestión del agua en la Ciudad de México. Adaptado de (Burns, 2009)

## *Antecedentes del aprovechamiento pluvial*

localizaban en Chapultepec. Tiempo después se concluyó que la causa de esto fue, sin duda, debida a la extracción del agua subterránea (Consejo Nacional de investigación., 1995).

El efecto de abatimiento fue estudiado las primeras veces de manera incidental y no de forma sistemática. Un acercamiento más formal fue hecho por Marsal y Masari en 1983 con el uso de decenas de piezómetros. Los niveles de agua que a principios del siglo XX (y con registro desde hace cientos de años, remontándose a la época de la colonia) se encontraban a profundidades cercanas al nivel del suelo, y con el paso del tiempo, estas profundidades medias sobrepasan los 40 metros en el centro de la zona metropolitana, y a más de 100 en las sierras que rodean a esta (Consejo Nacional de investigación., 1995) .

Otro efecto local que nos da indicios del impacto que se está causando en la zona metropolitana, tiene que ver con el efecto del suelo: los hundimientos de grandes zonas. En virtud de las características del subsuelo de la Ciudad de México, éste almacena un gran volumen de agua, y si no existiese alguna limitación o consecuencia de aprovechar ésta, sería más que suficiente para abastecer a toda la zona metropolitana por decenas de años.

Sin embargo, las arcillas lacustres (que son el suelo que encontramos comúnmente en la ZMVM) son altamente compresibles, y eso significa que a medida que se explotan los acuíferos se producen hundimientos importantes en la superficie del terreno. Se sabe que sólo el 23% del área de la ZMVM está cubierta por estratos arcillosos, y el suelo de lo que hoy es el centro histórico es uno de los más afectados desde el inicio. En la figura 1-5 se muestran los hundimientos totales del suelo de la zona centro de la Ciudad de México. Es importante observar la pendiente pronunciada que se muestra entre 1948 y 1958, que corresponde con un incremento en la extracción de agua de los pozos de la zona.

Es muy probable que la extracción de agua en el valle en los años 50 haya acelerado el descenso de los niveles de agua, y provocados hundimientos atípicos. Tanto las políticas de veda como la

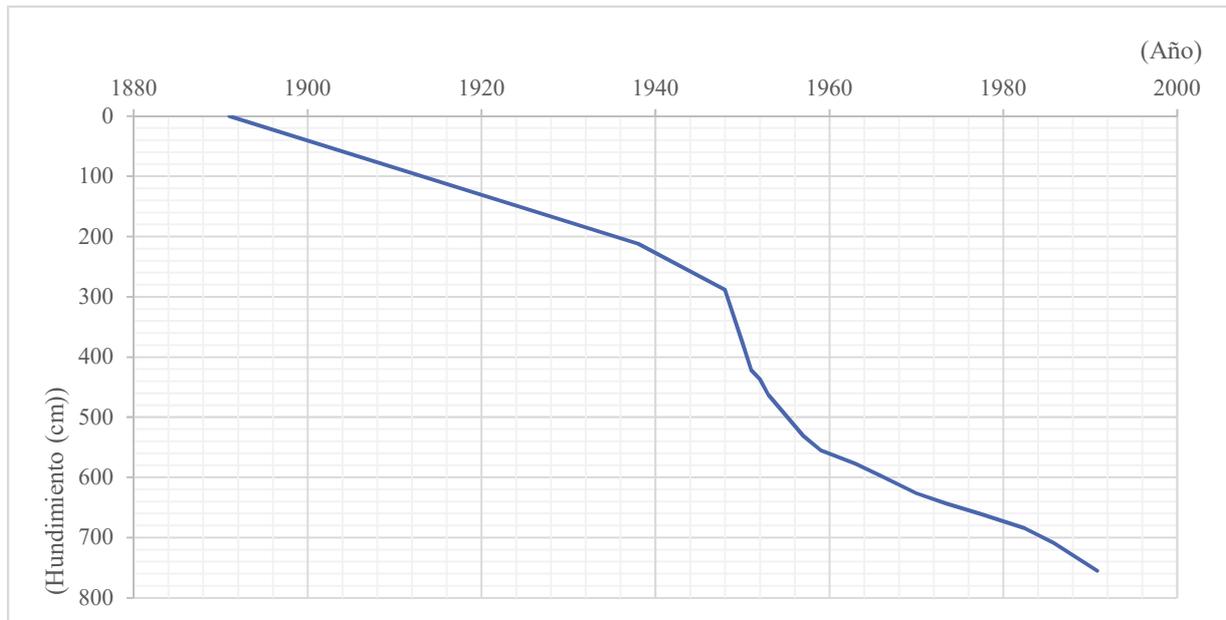


Figura 1-5 Gráfica de hundimientos promedio en el centro histórico de la CDMX. Se puede observar que hacia los años 50, los hundimientos aceleraron de manera exagerada (Marsal y Masari, 1983)

redistribución del bombeo, basadas en una mejor comprensión del fenómeno de hundimiento del suelo han permitido que este problema se mitigue (Consejo Nacional de investigación., 1995). Sin embargo, los impactos ambientales no son propios de la cuenca en la que la ciudad está asentada, pues como se mencionó en párrafos anteriores, al menos 20.3 m<sup>3</sup>/s son suministrados, y extraídos de cuencas diferentes, lo que nos indica, en primera instancia, un cambio en el ciclo hidrológico natural de las cuencas en las que esta agua es extraída. Por ejemplo, una vez construida la línea de conducción del acueducto de Lerma, una crisis en el abastecimiento de agua en la Ciudad de México a mediados de la década de los 60 obligó a las autoridades a ejercer una mayor explotación de los mantos acuíferos de la zona, tal vez de manera precipitada y sin una asesoría técnica adecuada. Hasta el día de hoy los efectos de esta decisión son visibles cuando se analiza con detenimiento el deterioro agrícola de la zona, la sequía de 1973 y la indudable destrucción de hábitats naturales que sólo quedan en la memoria de los pobladores más viejos (Legorreta, 2006). Existe una dependencia no tan evidente entre el abastecimiento de agua y las ciudades: la altitud máxima en la que la ciudad crecería. Hasta 1980 la cota 2350 fue el límite máximo en que, en teoría, podría suministrarse agua potable sin ningún problema, sin embargo, esta restricción física fue eliminada cuando al sistema de abastecimiento se le añadió el agua proveniente del sistema Cutzamala, que permitió crecer la ciudad hacia una altitud aproximada de 2500 msnm.

### 1.2. Alternativas sustentables para combatir el desabasto de agua

El aumento de la demanda de agua en los sitios donde el recurso es escaso o cuando existe una alta competencia por el agua crea la necesidad de utilizar las llamadas “fuentes alternativas de agua”, tal es el caso de los pozos de bajo rendimiento y manantiales, la escorrentía urbana, las aguas grises o las aguas pluviales captadas en sitio.

Han surgido varias tecnologías sobre la base de los nuevos desarrollos en los procesos biológicos y fisicoquímicos, que facilitan el uso de tales fuentes alternativas de agua y de manera cada vez más segura. El desarrollo de estas tecnologías genera puestos de trabajo, e introduce nuevas formas de usos de agua a pequeña escala (Jimenez Cisneros, 2001).

El uso de aguas grises y aguas residuales municipales junto con el reciclado del agua dentro de las industrias, están aumentando en todo el mundo. En algunos países el uso de las aguas residuales municipales puede representar hasta el 35% del total de agua extraída para uso.

La reutilización de agua para el riego es la estrategia más común de reciclaje de aguas residuales, especialmente en China, México y la India. El uso de aguas residuales puede ser riesgoso para la salud si estas no son tratadas. Sin embargo, existen opciones de bajo costo para reducir los patógenos o para procedimientos que permitan utilizar el agua usada mientras se mantiene el contenido de nutrientes, que pueden ser prometedoras para los agricultores de las regiones de bajos ingresos (Jiménez Cisneros & Asano, 2008).

En México, las aguas residuales no tratadas de la CDMX se utilizan para regar unas 90.000 hectáreas de tierras agrícolas, lo que beneficia a alrededor de 70.000 explotaciones en una zona donde hay pocas opciones de trabajo (Burns, 2009).

## *Antecedentes del aprovechamiento pluvial*

Las nuevas tecnologías para la extracción y potabilización del agua permitirán utilizar las nuevas fuentes de agua, como el agua captada de la neblina, la captación de agua de lluvia y la desalinización. El uso de fuentes de agua menos confiables, como ríos transitorios y pequeños acuíferos subterráneos también se está debatiendo en la comunidad científica.

La captación de agua pluvial está ganando interés en entornos urbanos. Esta tiene un impacto directo en la reducción del consumo de agua, además de disminuir el riesgo de inundación a través del aumento y la descentralización del almacenamiento, de reducir el consumo de energía, y mejorar el entorno urbano.

El uso de nuevas fuentes de agua creará puestos de trabajo inicialmente a nivel de investigación, por la necesidad de desarrollar nuevas tecnologías y metodologías, promoviendo el uso eficiente de los recursos al mismo tiempo que estimula el crecimiento económico en diversos sectores. Una vez que estas tecnologías estén funcionando, se crearán nuevos puestos de trabajo para el funcionamiento, supervisión, mantenimiento y puesta en marcha de los sistemas inteligentes. Está claro que, para ocupar estos nuevos puestos, los trabajadores deberán desarrollar distintas y nuevas habilidades. Existe una tendencia a que la gestión de los recursos hídricos y de riesgo utilice más datos, y deje de lado el uso de la infraestructura estática para utilizar sistemas más dinámicos, controlados en tiempo real y basados en la observación directa y precisa de los fenómenos naturales.

# 2 Marco conceptual

---

*“El agua es una de las sustancias químicas más investigadas, pero sigue siendo la menos entendida”*  
*John Emsley*

El proceso de diseño de cualquier proyecto de ingeniería se sustenta sobre bases teóricas que suelen ser resultado de investigación en ciencias básicas. El presente capítulo tiene como objetivo presentar un resumen de la teoría que se utilizó como base para la elaboración del prototipo *DISPLU*. Se tratan temas relacionados sobre todo a los fenómenos de precipitación desde lo más general hasta las formas particulares de hacer tratamientos estadísticos con los datos de lluvia recolectados. Después se habla de la calidad del agua, enfocando la teoría hacia la calidad del agua pluvial y de los fenómenos que afectan la calidad de este tipo de fuente hidráulica. En seguida se muestra un resumen de la teoría de la captación del agua pluvial y de los sistemas diseñados para este fin, terminando con el verdadero fenómeno que estudia este documento: los separadores de primeras aguas de lluvia,

## 2.1. Hidrología superficial

Según la *Federal Council for science and Technology* “La hidrología versa sobre el agua de la tierra, su existencia y distribución, sus propiedades físicas y químicas y su influencia sobre el medio ambiente, incluyendo su relación con los seres vivos.” El dominio de la hidrología abarca la historia completa del agua sobre la tierra (Sáenz, 1999).

El conocido ciclo hidrológico puede explicarse de una manera muy simple con 6 puntos (Gribbin, 2017):

1. El agua se evapora de los océanos y lagos de la tierra
2. El vapor de agua forma nubes
3. Las nubes se mueven a través de la atmósfera en patrones meteorológicos globales.
4. El vapor de agua se condensa y precipita en forma de lluvia, nieve o granizo
5. La lluvia cae en el suelo y fluye hacia las corrientes
6. Las corrientes fluyen hacia los ríos y, al final, hacia los océanos y lagos

La figura 2-1 muestra un diagrama esquemático más detallado del ciclo hidrológico. Las corrientes y los ríos son alimentados por la precipitación en tres formas: Flujo superficial, flujo subsuperficial y agua subterránea. Parte de la lluvia se pierde de inmediato debido a la evaporación y la evapotranspiración. Otra parte fluye por gravedad sobre la superficie del suelo y, al final, hacia la corriente y el resto se infiltra en el suelo. Del agua infiltrada, una parte fluye de forma subterránea,

o en la subsuperficial, por la gravedad hacia la corriente, y otra se filtra al cuerpo de agua subterránea almacenada, conocido como manto acuífero.

### 2.1.1. Ecuación fundamental de la hidrología

Una forma de entender el ciclo hidrológico, y visualizar las pérdidas o ganancias de agua de forma cuantitativa es mediante una ecuación sencilla, que puede expresarse verbalmente como: “*La diferencia entre el agua que entra y sale el sistema es igual al cambio de almacenamiento respecto al tiempo*” (Sáenz, 1999)

$$I - O = \frac{\Delta S}{\Delta t} \quad \text{ec. (2.1)}$$

De donde:

Entradas(I):

- Precipitación
- Importaciones de agua
- Escorrentía superficial desde otras cuencas
- Aguas subterráneas desde otras cuencas

Salidas(O):

- Evaporación
- Transpiración
- Escorrentía superficial hacia otras cuencas
- Exportaciones de agua
- Aguas subterráneas hacia otras cuencas
- Infiltración

Cambio de almacenamiento ( $\Delta S$ )

- Almacenamiento de aguas subterráneas.
- Almacenamiento por cambio de humedad del suelo.
- Almacenamiento superficial en embalses, en canales y en la propia escorrentía superficial.

Área de drenaje

Al calcular la cantidad de escurrimiento en una corriente que resulta de un fenómeno pluvial, se debe tener en cuenta el área sobre la que cae la lluvia. Para cada corriente, un área bien definida de terreno intercepta la precipitación y la conduce a la corriente. El área de tierra recibe el nombre de superficie de captación, cuenca colectora o cuenca de drenaje. En general, estos términos se utilizan de manera indiscriminada.

La línea imaginaria que perfila el límite de la cuenca de drenaje recibe el nombre de **divisoria de la cuenca** y se determina por la topografía del terreno (Gribbin, 2017) .

Toda el agua de lluvia que cae dentro de la cuenca de drenaje se dirige hacia una corriente o caudal de salida, mientras que la lluvia que cae fuera de la esta se abre paso alejándose de la corriente hacia alguna otra corriente (Gribbin, 2017).

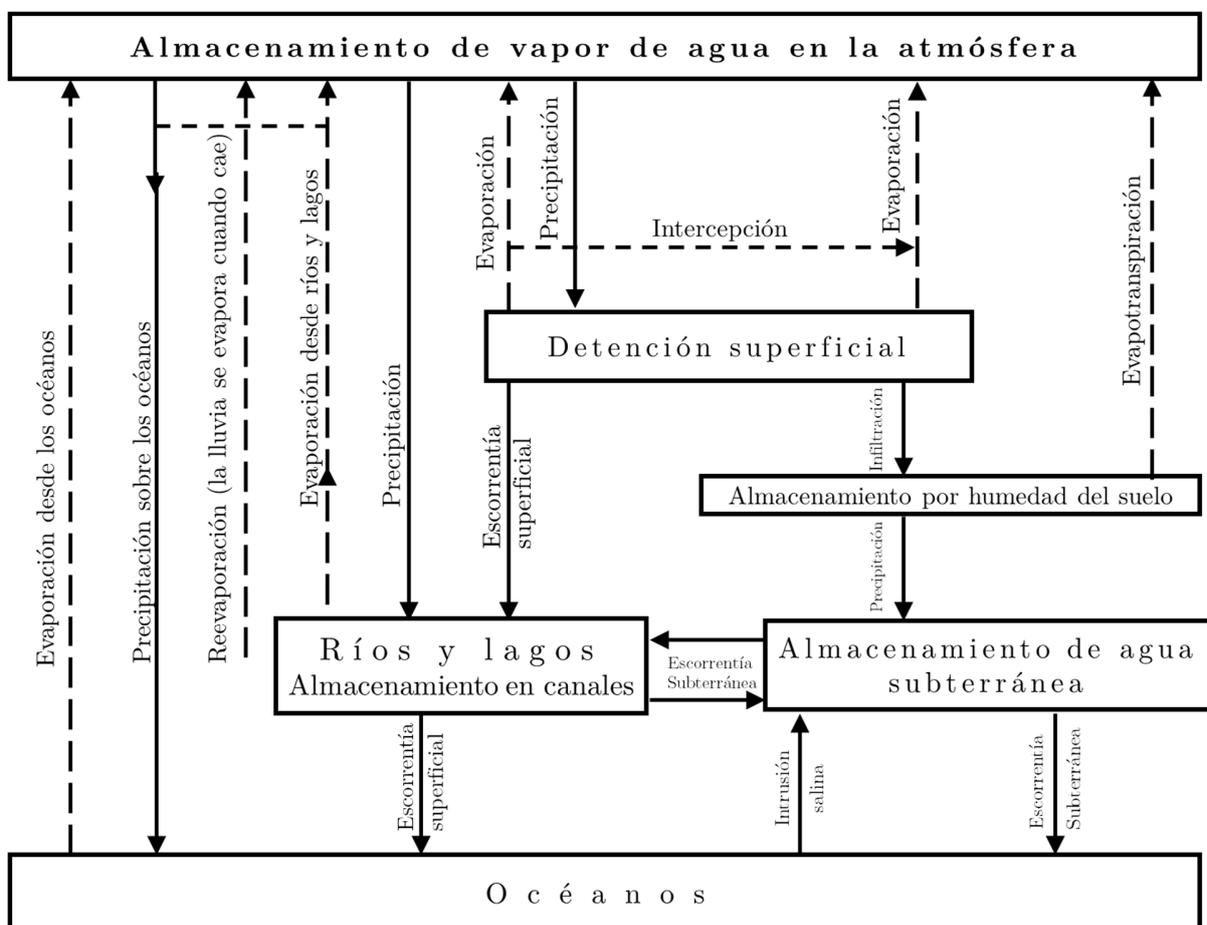


Figura 2-1 Diagrama del ciclo hidrológico. Adaptado de (Sáenz, 1999)

Modelo teórico:

La figura 2-2 ilustra un modelo teórico de las entradas y salidas de un sistema básico de precipitación. Nótese que se verifica la ecuación (2.1), pues se tiene que  $I - O = \Delta S / \Delta t$ . Se tiene que acumular una altura mínima para que haya escorrentía en A (figura 2-2). En este sistema toda la precipitación será transformada en caudal, siempre y cuando sean despreciables las pérdidas por evaporación durante el tiempo de “entrada”

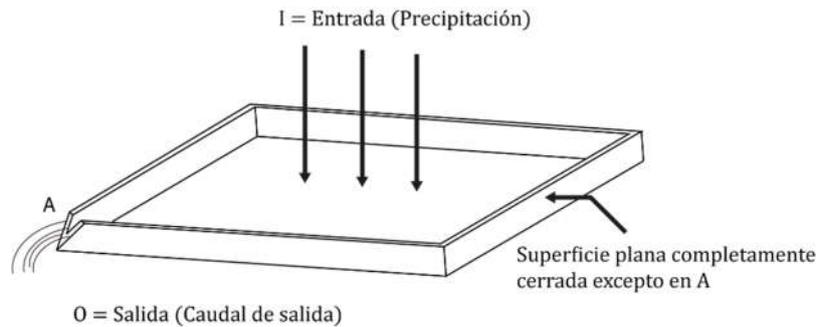


Figura 2-2 Modelo teórico de la superficie de captación. Adaptado de (Sáenz, 1999)

Modelo práctico:

Diversas pérdidas ocurren durante el proceso; la evaporación se presenta desde que se inicia la precipitación. Por otro lado, la superficie del terreno no es tan plana como la del modelo ideal. Existen depresiones en el terreno; al caer el agua y acumula se puede evaporar o infiltrar en éste. Además, cuando el agua llega a una corriente y se transforma en escorrentía, continúa el proceso de evaporación, en cantidades que pueden no ser despreciables.

También, durante la infiltración, al penetrar el suelo, el agua sigue diversos caminos, quedando almacenada temporalmente en dicho medio; de ahí, por medio del proceso de percolación, continúa a estratos más profundos, formando el nivel freático, o se mueve lateralmente como escorrentía

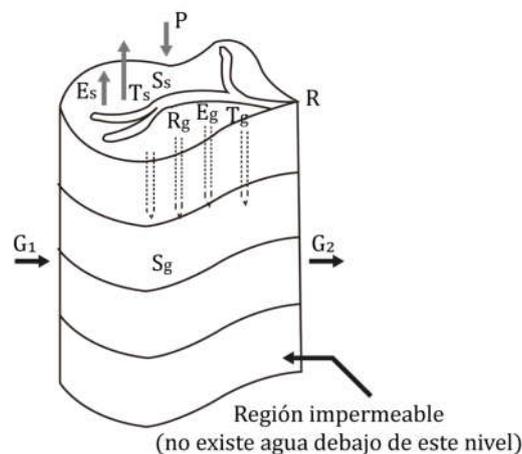


Figura 2-3 Esquema de balance hídrico Adaptado de (Sáenz, 1999).

subterránea, y puede surgir superficialmente como fuente de escorrentía superficial o, según la localización de la divisoria del nivel freático, escurrir hacia otra cuenca.

a) Balance hídrico encima de la superficie:

$$P - R + R_g - E_s - T_s - I = S_s \quad \text{ec. (2.2)}$$

b) Balance hídrico debajo de la superficie

$$I + G_1 - G_2 - R_g - E_g - T_g = S_g \quad \text{ec. (2.3)}$$

c) Balance hídrico en la cuenca:

$$P - R - (E_s + E_g) - (T_s + T_g) + (G_1 - G_2) = (S_s + S_g) \quad \text{ec. (2.4)}$$

En donde

*P*: Precipitación

*R*: Escorrentía superficial

*E*: Evaporación

*T*: Transpiración

*I*: Infiltración

*S*: Almacenamiento

*G<sub>1</sub>*: Escorrentía subterránea entrante

*G<sub>2</sub>*: Escorrentía subterránea saliente

*G<sub>1</sub>*: Escorrentía subsuperficial que aparece como escorrentía superficial

\*Los subíndices s y g significan el origen del vector, siendo respectivamente encima y debajo de la superficie.

## 2.2. Precipitación

El régimen hidrológico de una región es función de características físicas, geológicas topográficas y climatológicas. Los factores climatológicos de mayor relevancia son: la precipitación evaporación, temperatura y humedad del aire y los vientos; estos últimos tres en la medida en que ejercen una influencia sobre la precipitación y la evaporación (Sáenz, 1999).

En relación con la precipitación es importante analizar sus formas, distribución y las medidas y análisis de datos necesarios para su cuantificación. La precipitación se presenta en patrones variables, esto dificulta la cuantificación para propósitos de diseño de infraestructura.

Se exigen conocimientos básicos sobre los otros fenómenos meteorológicos que influyen en los dos factores más importantes: precipitación y evaporación. A continuación, se describen conceptos importantes para entender el fenómeno de precipitación (Sáenz, 1999):

### Atmósfera

El aire natural seco está compuesto de:

- Aire seco.
- Vapor de agua
- Partículas sólidas en suspensión.

El vapor de agua producto de la evaporación de ríos, océanos, lagos y embalses, puede llegar a ser el 4% del volumen del aire natural. Las partículas en sólidas en suspensión que se listaron antes suelen recibir el nombre de “Aerosoles”, bajo la definición de que son cualquier tipo de partículas sólidas o líquidas suspendidas en un gas, El tamaño de las partículas puede ser desde 0,002  $\mu\text{m}$  a más de 100  $\mu\text{m}$ . Las partículas de origen inorgánico son de gran interés e importancia para la hidrología, pues son responsables en grado significativo de la condensación del vapor de agua y la formación consiguiente de nubes.

### Humedad atmosférica

El siguiente concepto que debe entenderse es la humedad atmosférica. Es un hecho que toda precipitación se deriva del agua atmosférica (vapor de agua). También debe saberse que el contenido de humedad del aire es responsable de los procesos de evaporación: entre menos humedad atmosférica se presente en un entorno es más fácil que se presente evaporación.

En los procesos meteorológicos las presiones son relativamente pequeñas; por consiguiente, el aire seco puede ser considerado como un gas ideal. Lo mismo se puede decir del vapor de agua, exceptuando los pequeños intervalos de presión y temperatura próximos al punto de condensación. Otras características importantes de la humedad atmosférica son:

- La máxima cantidad de vapor de agua es función de la temperatura e independientemente de la coexistencia de otros gases. Adicionalmente, depende en menor grado de la altitud.
- La presión de aire seco más la presión de vapor de agua es igual a la presión del aire húmedo.
- Los índices más importantes de la humedad son la presión parcial de vapor, la humedad absoluta, la humedad específica, el radio de mezcla, la humedad relativa y la temperatura del punto del rocío.

- Espacio saturado: cuando la máxima cantidad de vapor de agua para una determinada temperatura está contenida en un espacio dado.
- Presión de saturación: Es la presión ejercida por el vapor de agua en un espacio saturado ( $e_s$ ). Es la máxima presión de vapor de agua posible para una temperatura dada, a una altura específica.
- La unidad de presión estándar en meteorología es el milibar (mb), que es igual a 1000 dinas/cm<sup>2</sup>
- La cantidad máxima de vapor de agua que la atmósfera es capaz de contener depende directamente de la temperatura, y aumenta con ella.

También es fundamental conocer cuál es, en general, la distribución geográfica de la humedad para entender el proceso de precipitación. Lo importante que hay que saber acerca de la distribución geográfica de la humedad es que:

- La humedad tiende a decrecer con el aumento de la latitud.
- La humedad relativa, que es una función inversa de la temperatura, tiende a aumentar con el aumento de la latitud.
- La humedad atmosférica es máxima sobre los océanos y decrece a medida que se avanza hacia el interior de los continentes.
- La humedad decrece con la disminución de temperatura.
- La humedad es mayor sobre áreas vegetadas que sobre el suelo desértico.

Por último, las variaciones en el tiempo de la humedad siguen un patrón general:

- La humedad es máxima en verano y mínima en el invierno.
- La humedad es mínima al salir el sol (por la condensación del rocío) y máxima durante el día.
- La humedad relativa es máxima en la mañana y mínima en la tarde.

### 2.2.1. Formación y tipos de precipitación

La precipitación es, en general, el término que se refiere a todas las formas de humedad emanadas de la atmósfera y depositadas en la superficie terrestre, tales como lluvia, granizo, rocío, neblina, nieve o helada.

Los elementos necesarios para la formación de las precipitaciones son los siguientes:

- Humedad atmosférica
- Radiación solar
- Mecanismo de enfriamiento del aire
- Presencia de núcleos higroscópicos para que haya condensación.
- Mecanismo de crecimiento de las partículas.

El proceso de la formación de precipitación es el siguiente:

- a) El aire húmedo de los estratos bajos es calentado por conducción
- b) El aire húmedo, entonces, se torna más leve que el de las vecindades y experimenta una ascensión adiabática.
- c) El aire húmedo, entonces, se expande y se enfría a razón de  $1^{\circ}\text{C}$  por cada 100 m (expansión adiabática seca) hasta llegar a una condición de saturación, para llegar a su nivel de condensación.
- d) A partir de ese nivel, y con núcleos higroscópicos, el vapor de agua se condensa formando minúsculas gotas a lo largo de dichos núcleos.
- e) Dichas gotas se mantienen en suspensión hasta que, por un proceso de crecimiento, alcanzan el tamaño suficiente para precipitar.

Existen dos procesos de crecimiento de las gotas:

1. Coalescencia: es el aumento de tamaño de las gotas debido al contacto con otras gotas. Además, las gotas grandes ya cayendo incorporan a las gotas más pequeñas.
2. Difusión de vapor: Es el proceso por el cual el aire, después del nivel de condensación, continúa evolucionando y provoca difusión (transporte) de vapor supersaturado y su consiguiente condensación en torno a las pequeñas gotas que aumentan de tamaño.

Las precipitaciones pueden ser clasificadas de acuerdo con las condiciones que producen movimiento vertical del aire: convectivas, orográficas y de convergencia.

#### Precipitaciones convectivas

Cuando una masa de aire próxima a la superficie del terreno aumenta su temperatura, la densidad disminuye y la masa de aire trata de ascender y de ser remplazada por otra masa de aire más densa. Este proceso es bastante lento si las masas de aire están en calma y no hay turbulencia. En cambio, en regiones tropicales donde estas precipitaciones son muy típicas, el calentamiento desigual de la superficie terrestre provoca el surgimiento de estratos de aire con densidades diferentes y genera una estratificación térmica de la atmósfera en equilibrio inestable.

Si ese equilibrio es roto por cualquier motivo (viento, supercalentamiento), provoca una ascensión brusca y violenta del aire menos denso, capaz de alcanzar grandes altitudes.

Estas precipitaciones son de gran intensidad y corta duración, y se concentran en áreas pequeñas. Son importantes en proyectos de pequeñas hoyas hidrográficas

#### Precipitaciones orográficas.

Resultan de la ascensión mecánica de corrientes de aire húmedo con movimiento horizontal cuando chocan sobre barreras naturales, tales como montañas.

Precipitación por convergencia.

Existen tres tipos: convergencia directa, ciclones, y frentes.

La **convergencia directa** se presenta en el caso de que dos masas de aire de aproximadamente la misma temperatura, que viajan en dirección contraria, se encuentran a un mismo nivel. El choque entre las dos masas de aire hace que ambas se eleven.

**El ciclón** es una masa de aire circular con baja presión que gira en el sentido contrario al de las manecillas del reloj en el hemisferio norte. Tiene en su centro el “ojo del ciclón”, en el cual, la presión es baja comparada con la masa de aire. Funciona, entonces, como una chimenea, haciendo

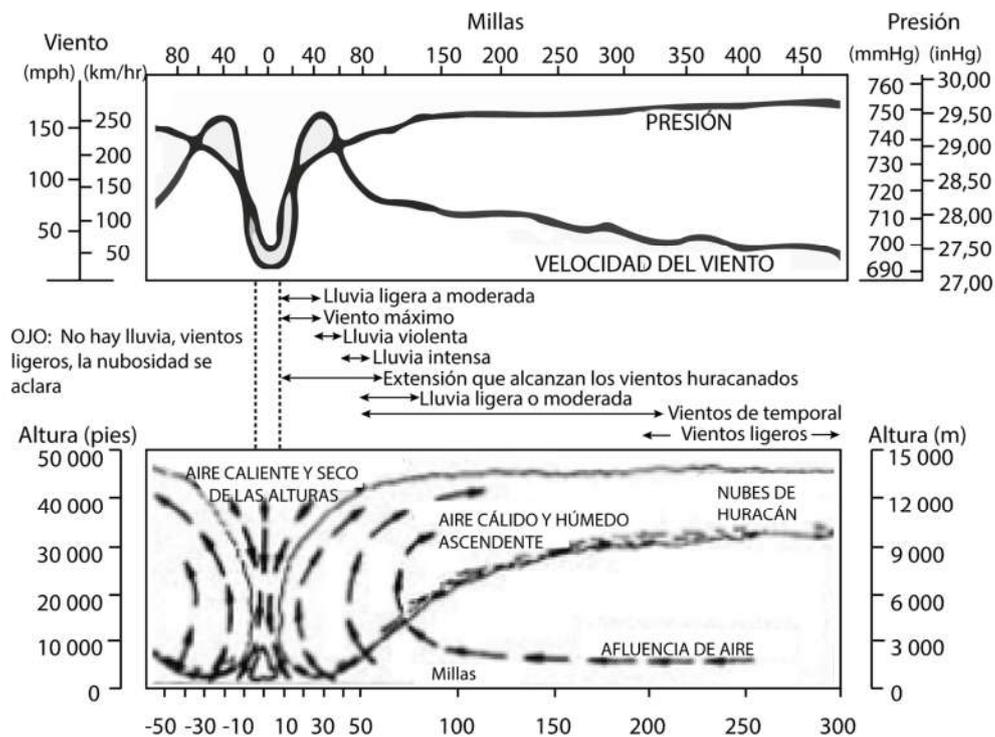


Figura 2-4 Corte vertical de un ciclón. Adaptado de (Sáenz, 1999)

subir el aire de las capas inferiores. El anticiclón es una zona de alta presión circular, que gira en el sentido de las manecillas de reloj del hemisferio norte.

### Precipitaciones del tipo frontal

Se forma un **frente** cuando una masa de aire en movimiento encuentra otra masa de aire de diferente temperatura, si la masa de aire en movimiento es fría y se encuentra en su camino otra de temperatura superior, el aire de esta última, por ser menos denso, se eleva sobre la capa de aire



Figura 2-5 Frente frío y cálido. Adaptado de (Sáenz, 1999)

frío formando un frente frío. Si la masa de mayor temperatura encuentra en su movimiento una masa de aire frío se forma un frente cálido.

Las precipitaciones por convergencia, en general, son de larga duración y presentan intensidades de bajas a moderadas, y se esparcen por grandes áreas.

### 2.2.2. Medidas pluviométricas

Se expresa la cantidad de lluvia,  $\Delta h$ , como la altura caída y acumulada sobre una superficie plana e impermeable. Para dichas mediciones se utilizan pluviómetros y pluviógrafos.

Medidas características:

- a) **Altura pluviométrica**, en mm, se expresa bajo un periodo de tiempo.
- b) **Intensidad de precipitación**

$$i = \frac{\Delta h}{\Delta t} \left[ \frac{mm}{hr} \right] \quad \text{ec. (2.5)}$$

- c) **Duración**. Es el periodo de tiempo en horas, por ejemplo, desde el inicio hasta el fin de la precipitación

En la siguiente figura 2-6 se presenta un registro pluviográfico típico, cuyo eje de las ordenadas es la cantidad de lluvia caída, y el eje de las abscisas el tiempo en el cual dicha lluvia se presentó.

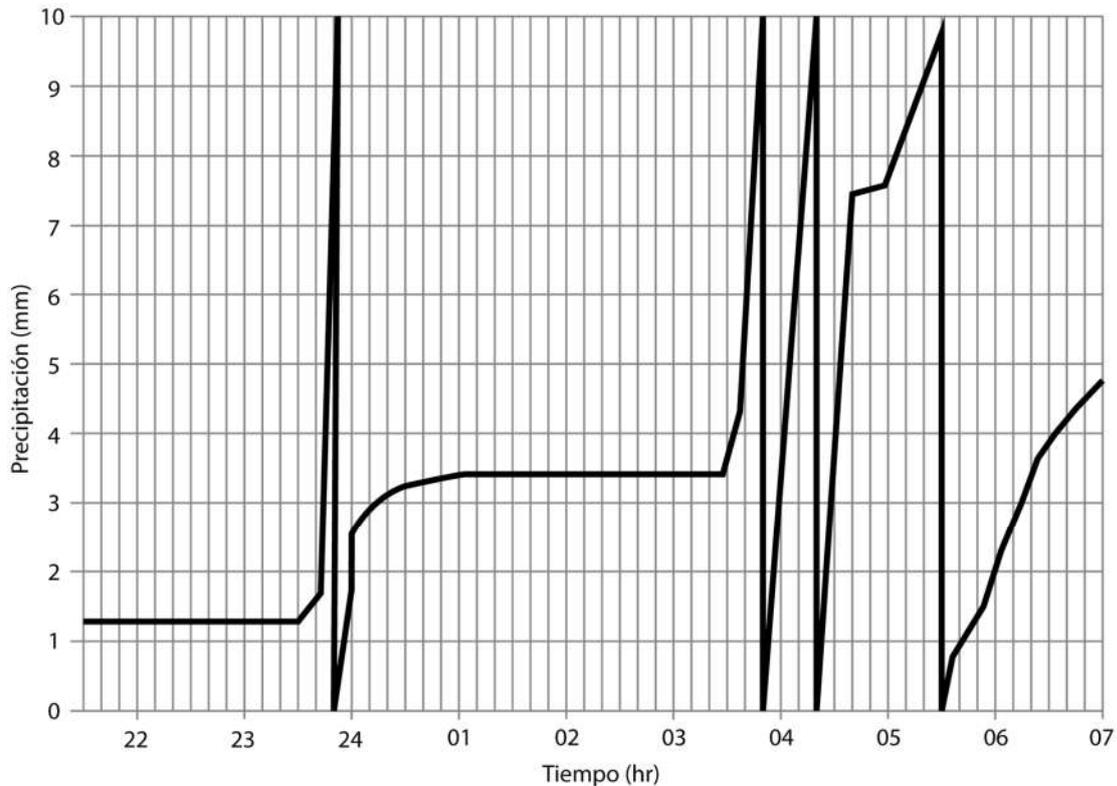


Figura 2-6 Registro pluviográfico en una carta de duración diaria (Elaboración propia).

### Datos faltantes

Para estaciones pluviométricas que tienen registros con datos incompletos, debido a la ausencia del aparato durante determinado periodo de tiempo o algún problema con la operación; y debido a que en hidrología se trabaja con series continuas, se deben completar los datos faltantes.

En general se puede utilizar la siguiente ecuación para completar los datos faltantes:

$$P_x = \frac{1}{n} \left[ \left( \frac{N_x}{N_1} \right) P_1 + \left( \frac{N_x}{N_2} \right) P_2 + \dots + \left( \frac{N_x}{N_n} \right) P_n \right] \quad \text{ec. (2.6)}$$

en donde:

$n$  = número de estaciones pluviométricas con datos de registros continuos cercanas a la estación  $x$ , la cual va a ser completada en su registro.

$P_x$  = precipitación de la estación “ $x$ ” durante el periodo de tiempo por completar.

$P_1$  a  $P_n$  = precipitación en las estaciones 1 a  $n$  durante el periodo de tiempo por completar.

$N_x$  = precipitación media anual a nivel multianual de la estación  $x$ .

$N_1$  a  $N_n$  = precipitación media anual a nivel multianual de las estaciones 1 a  $n$ .

## Análisis Estadístico de datos hidrológicos

Para la sección 5 de esta tesis se hicieron algunos análisis estadísticos de datos hidrológicos con el fin de obtener un punto de partida del gasto con el que debería funcionar el dispositivo. Debido a ese proceso, aquí se presentan técnicas estadísticas para el análisis de datos.

En una serie de datos estadísticos de una estación hidrológica de medición es necesario resumir todos los datos de manera que puedan ser sintetizados en caractericen un punto de vista considerado.

Se busca definir una serie de  $n$  observaciones de valores individuales  $x_i$  con  $i \leq n$ , desde tres puntos de vista siguientes:

### 1. *Valor central o dominante de la serie:*

#### a) Media

La media aritmética se define como:

$$\bar{X} = \left( \sum_{i=1}^n x_i \right) \frac{1}{n} \quad \text{ec. (2.7)}$$

#### b) Mediana

Es el valor que divide las frecuencias de una distribución de probabilidades en partes iguales, en otras palabras, es el valor que ocurre con una probabilidad del 50%. Es el mismo concepto es aplicable a una tabla de frecuencias de una serie de datos agrupados en clases o categorías.

La mediana en problemas hidrológicos es muchas veces la medida más conveniente de la tendencia central, porque no se ve afectada por valores externos.

#### c) Moda

Es el valor que ocurre con mayor frecuencia en una distribución de probabilidades, o en una tabla de frecuencias de una serie de datos agrupados en clases o categorías

### 2. *Dispersión o fluctuación de diversas observaciones alrededor del valor central.*

#### a) Desviación estándar:

$$S = \sqrt{\frac{(\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2)}{n - 1}} \quad \text{ec. (2.8)}$$

b) Varianza;

$$var = S^2 \quad \text{ec. (2.9)}$$

c) Rango: Diferencia entre el menor y mayor valor de la serie,

d) Coeficiente de variación:

$$C_R = \frac{S}{\bar{X}} \quad \text{ec. (2.10)}$$

### 3. Característica de forma

Se define por el coeficiente de oblicuidad. Este coeficiente define la simetría de la distribución.

$$C_s = \frac{a}{S^3} \quad \text{ec. (2.11)}$$

$$a = \frac{n}{(n - 1)(n - 2)} \left( \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^3 \right) \quad \text{ec. (2.12)}$$

$C_s = 0$	Distribución simétrica
$C_s > 0$	Distribución oblicua hacia la derecha
$C_s < 0$	Distribución oblicua hacia la izquierda

Variable aleatoria: Se define como variable aleatoria una cantidad variable  $x$  por medio de la cual sea posible definir una función  $P(x_i)$  que, para cada valor real  $x$  que la variable aleatoria pueda tomar, mida la probabilidad que se verifiquen de  $x$  menores o al menos iguales a  $x$ .

$$P(x \leq x_i) = P(x_i) \quad \text{ec. (2.13)}$$

## 2.3. Calidad del agua

Siendo el agua la sustancia básica para la supervivencia de cualquier organismo terrestre; desde las primitivas células procariotas hasta organismos de alta complejidad.

Particularmente para la especie humana el agua es fundamental para su salud y no es menos que un derecho humano básico. Asimismo, es un componente de las políticas eficaces de protección a la salud.

Rigurosamente el agua está formada de dos átomos de hidrógeno unidos a uno de oxígeno por un enlace covalente ( $H_2O$ ). Esta sustancia es llamada en el argot científico como el disolvente universal, pues una de sus propiedades especiales es la capacidad para actuar como base en reacciones con ácidos como el ácido clorhídrico ( $HCl$ ) y el ácido acético ( $CH_3COOH$ ) por otro lado funciona como un ácido frente a bases como el amoníaco ( $NH_3$ ) (Chang, 2010). Esa propiedad es de especial importancia pues al estar en contacto permanente con el medio terrestre es común que sus moléculas reaccionen al entrar en contacto con otras sustancias; y es gracias a esta capacidad que en el agua ambiental siempre están disueltos iones o sustancias, y es prácticamente imposible que un depósito de agua esté libre de sustancias ajenas al  $H_2O$ .

Que el agua sea impura no es un obstáculo para el sano desarrollo de la vida, es un hecho que nutrientes necesarios para algunos organismos son aportados gracias a los compuestos disueltos que ésta contiene. Por lo tanto, cuando se habla de buena calidad del agua no se debe tomar como un sinónimo de la pureza misma del componente.

La calidad del agua involucra la descripción física, química y biológica de las características del agua. Estos atributos influyen en la conveniencia para su consumo humano y para la salud de los ecosistemas. Los constituyentes químicos del agua son sustancias que pueden disolverse en ella, incluyendo gases, metales, nutrientes, pesticidas, u otros compuestos orgánicos.

Las características físicas más comunes del agua son el olor, sabor, temperatura y turbidez. Mientras que los componentes biológicos del agua tienen que ver con los organismos que la habitan, como las bacterias, virus, protozoos, fitoplancton, zooplancton, insectos, plantas, animales y peces. Los orígenes del concepto de calidad del agua no son tan claros, sin embargo, se suele pensar que ha existido desde el inicio de la población, probablemente nuestros ancestros evaluaban empíricamente la calidad del agua basados en sus propiedades físicas o estéticas como el color, olor y el sabor. Evidencia histórica muestra que los humanos primitivos desarrollaron métodos para mejorar la calidad del agua ya desde el 4000 A.C (USEPA, 2000). Escritos griegos documentan métodos de tratamiento de agua, indicando que “el agua impura debe ser purificada hirviéndola sobre el fuego, calentada al sol, sumergiendo hierro caliente en ella o por filtración mediante arena y grava gruesa”. Los egipcios usaban alumbre potásico  $KAl(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$  para remover partículas en el agua por medio de floculación hacia los años 1500 A.C (Li & Migliaccio, 2011).

El concepto moderno de calidad del agua se empieza a hacer presente en 1700, cuando los avances científicos en microbiología, física y química pudieron darnos un mejor entendimiento de la contaminación de agua para beber. Con el fin de conseguir una mejor calidad del agua, la filtración con arena fue adoptada en la Europa de 1800 como un método efectivo para remover partículas. A principios de 1900, el tratamiento del agua dejó de centrarse únicamente en las características estéticas de esta, para centrarse en la eliminación de patógenos. Por estas fechas se registran los primeros usos de ozono para tratar agua en Europa, y cloro en Estados Unidos.

El tratamiento del agua se ha hecho cada vez más común y se han desarrollado políticas públicas, estándares y regulaciones a la par que tenemos mejores tecnologías para este fin (Li & Migliaccio, 2011).

La interpretación de una “buena” o “deficiente” calidad del agua difiere del uso que se le dé, por ejemplo, se ha demostrado que altas concentraciones de nitratos en el agua bebible pueden causar desórdenes fatales en los niños, conocidos comúnmente como *el síndrome del niño azul*. En cambio, las altas concentraciones de nitratos en el agua de irrigación tienden a ayudar al crecimiento de las cosechas. Por lo tanto, para un agua de estas características, podríamos decir que la calidad es buena cuando su fin es irrigar sembradíos, y es de calidad deficiente cuando se usa para beberla. Por lo tanto, la calidad del agua debe ser ligada siempre con su uso, tal que los estándares de calidad varían dependiendo de este hecho.

Se estima que el 8% del agua mundial es usada para consumo doméstico, el 22% para usos industriales y un gran 70% para usos de irrigación.

La accesibilidad y protección de la calidad del agua son características resueltas por medio de obras de infraestructura para su abastecimiento y tratamiento. Saber cuándo el agua es segura para la población es un tema importante, pues afecta directamente a la salud pública.

Definir la calidad del agua va más allá de describir sus atributos fisicoquímicos o biológicos; pues implica tomar en cuenta el contexto ecológico, así como los usos y valores que se le otorgan. Sin embargo, cuando se habla de **agua potable**, el reto se reduce a monitorear y establecer parámetros para que el agua sea accesible y segura para la población, verificando que el agua no sobrepase los límites permisibles, y de no ser adecuada, tratarla para que lo sea.

En algunas regiones, se ha comprobado que las inversiones en sistemas de abastecimiento de agua y de tratamiento pueden ser rentables desde un punto de vista económico, ya que la disminución de los efectos adversos para la salud y la consiguiente reducción de los costos de asistencia sanitaria es superior al costo de las intervenciones (OMS, 2006).

Las medidas de calidad del agua se clasifican de diferentes maneras, en la mayoría de los casos como características físicas, químicas y biológica

### 2.3.1. Características físicas para describir la calidad del agua

En general, una primera evaluación de las condiciones del agua se basa en estudiar las características físicas, que consideran lo siguiente (Tchobanoglous & Schroeder, 1985) :

- a) Sólidos: Según su tamaño y estado se pueden clasificar como sedimentables, suspendidos, coloidales y disueltos.
- b) Turbidez: Se verifica por la penetración de la luz a través del líquido y se relaciona con la presencia de materiales orgánicos o inertes suspendidos en el agua con diámetros que van desde 1 nm a 1 mm, tal como arcillas, limos además la presencia de plancton u otros microorganismos; esta característica se mide en unidades de turbiedad (UT), o bien, unidades de turbiedad nefelométricas (UTN) (González Reyes, 2017).
- c) Olor: Que puede indicar la presencia de materia orgánica en descomposición o la presencia de minerales.
- d) Temperatura: Suele alterar un gran número de características del agua, ya que su aumento influye en la tasa de velocidad de las reacciones químicas y biológicas.
- e) Color, que revela materia coloidal en suspensión.

### 2.3.2. Características químicas para describir la calidad del agua

La presencia de algunos iones como el calcio, magnesio o el plomo se relacionan directamente con las características químicas del agua. Burdamente se suelen usar referencias como la alcalinidad, la dureza y la conductividad como métodos generales para estimar la calidad del agua (Ibarra, 2010).

Mediciones un poco más complejas y concretas suelen ser las siguientes: (Tchobanoglous & Schroeder, 1985):

- a) Iones mayores en agua. Incluyen los cationes calcio ( $\text{Ca}^{+2}$ ), magnesio ( $\text{Mg}^{+2}$ ), sodio ( $\text{Na}^{+}$ ) y potasio ( $\text{K}^{+}$ ), y los aniones bicarbonato ( $\text{HCO}_3^{-}$ ), cloruros ( $\text{Cl}^{-}$ ) y nitratos ( $\text{NO}_3^{-}$ ). Las interacciones entre iones determinan muchas características químicas.
- b) Iones menores en agua. Comprenden cationes como aluminio ( $\text{Al}^{+3}$ ), amonio ( $\text{NH}_4^{+}$ ), arsénico ( $\text{As}^{+}$ ), bario ( $\text{Ba}^{+2}$ ), borato ( $\text{BO}_4^{-3}$ ), cobre ( $\text{Cu}^{+2}$ ), hierro ( $\text{Fe}^{+3}$ ) y manganeso ( $\text{Mn}^{+2}$ ), al igual que aniones como bisulfato ( $\text{HSO}_4^{-}$ ), bisulfito ( $\text{HSO}_3^{-}$ ), carbonatos ( $\text{CO}_3^{-2}$ ), flúor ( $\text{F}^{-}$ ), hidróxido ( $\text{OH}^{-}$ ), monofosfatos ( $\text{H}_2\text{PO}_4^{-2}$ ), difosfatos ( $\text{HPO}_4^{-3}$ ), trifosfatos ( $\text{PO}_4^{-3}$ ), sulfuro ( $\text{S}^{-2}$ ) y sulfito ( $\text{SO}_3^{-2}$ ).
- c) Especies inorgánicas. Principalmente metales pesados, entre ellos: arsénico ( $\text{As}^{+3}$ ), bario ( $\text{Ba}^{+2}$ ), cadmio ( $\text{Cd}^{+2}$ ), cromo ( $\text{Cr}^{+3}$  y  $\text{Cr}^{+6}$ ), plomo ( $\text{Pb}^{+2}$ ), mercurio ( $\text{Hg}^{+2}$ ), selenio ( $\text{Se}$ ), plata ( $\text{Ag}^{+2}$ ), zinc ( $\text{Zn}^{+2}$ ) y cianuro ( $\text{CN}^{-}$ ).
- d) Nitrógeno y fósforo. Especies inorgánicas aportadas a los sistemas terrestres por las actividades humanas. Se identifican en fertilizantes para las plantas y se vierten con aguas residuales o de retorno agrícola a cuerpos de agua. Algunos de estos compuestos son: amonio ( $\text{NH}_4^{+}$ ), nitritos ( $\text{NO}_2^{-}$ ), nitratos ( $\text{NO}_3^{-}$ ), nitrógeno total (Ntotal), ortofosfatos ( $\text{Na}_3\text{PO}_4$  o  $\text{Na}_2\text{HPO}_4$ ) y fósforo total ( $\text{P}_{\text{total}}$ ).
- e) pH. Concentración del ión hidrógeno, que brinda las condiciones de neutralidad, acidez o alcalinidad del agua. Es relevante porque determina las reacciones químicas.
- f) Alcalinidad. Capacidad del agua de neutralizar ácidos.
- g) Conductividad. Parámetro que permite caracterizar la habilidad de una solución para conducir una corriente eléctrica; se determina por los iones en solución.
- h) Dureza. Representa la suma de las concentraciones de calcio y magnesio.

### 2.3.3. Normatividad

Distintos organismos en diferentes niveles han emitido lineamientos para certificar que el agua es apta para el consumo humano sin que suponga un riesgo para la salud

En Estados Unidos La EPA a través de sus National Drinking Water Regulations dictaminan parámetros primarios y secundarios de calidad. Las regulaciones primarias están enfocadas a estándares de calidad y técnicas de tratamiento que limitan los niveles de contaminantes en el agua potable. Los parámetros primarios son obligatorios y representan con claridad los máximos niveles de contaminantes que el agua potable puede tener. La EPA considera un segundo tipo de estándares conocidos como Secondary Drinking Water Standards, que, a pesar de no ser legalmente

obligatorios, suelen ser importantes para dar entregar un producto agradable a los sentidos de la población.

Asimismo, las normas mexicanas establecen parámetros para determinar si el agua es potable. La tabla 2-2 describe de manera precisa cuales son los parámetros de calidad del agua que exigen distintos organismos (nacionales e internacionales)

**Tabla 2-1 Parámetros de calidad del agua potable. Elaboración con datos de: (EPA, 2009), (Health Canada, 2017), (NOM-127-SSA1-1994), (OMS, 2006)**

Sustancia	EE.UU.	Canadá	U.E	OMS	México
<b>Inorgánicas</b>					
Arsénico	0.05	0.05	0.05	0.05	0,05
Bario	1	1	0.1	ND	0,70
Cadmio	0.01	0.005	0.005	0.005	0,005
Cromo	0.05	0.05	0.05	0.05	ND
Flúor	4	1.5	ND	1.5	1.5
Plomo	0.05	0.05	0.05	0.05	0.01
Mercurio	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001
Nitratos	10	10	50	10	10
Selenio	0.01	0.01	0.01	0.01	ND
Plata	0.05	0.05	0.01	ND	ND
<b>Microbiológicos</b>					
Coliformes(organismos/100ml)	<1	10	0	0	0
Turbiedad (UTN)	1-5	5	0-4	<1	<5
<b>Orgánicos</b>					
2,4-D	0.01	0.01	ND	0.001	0.03
Edrin	0.0002	0.0002	ND	ND	ND
Lindano	0.0004	0.004	ND	ND	ND
Metoxicloro	0.1	0.1	ND	0.001	0.0002
Pesticidas(total)	ND	0.1	0.005	ND	ND
Toxafeno	0.005	0.005	ND	ND	ND
2,425-TP Silvex	0.01	0.01	ND	ND	ND
Trihalometanos	0.1	0.35	0.001	0.03 (solo CHCl <sub>3</sub> )	0.2
<b>Radionucleicos</b>					
Partículas Beta y actividad fotónica	4mrem	ND	ND	1 bq/L <sup>5</sup>	
Actividad bruta de partículas alfa	15piCi/L	ND	ND	.1 Bq/L <sup>5</sup>	
Radio -226 + radio-228	5 pCi/L	1 bq/L <sup>5</sup>	ND	NS	
<b>Químicos organicos volatiles</b>					
Benzeno	0.005	ND	ND	0.01	0.01
Carbon tetrachloride	0.005	ND	ND	0.003	
1,1-Dichloroethylene	0.007	ND	ND	0.003	

ND: no es parámetro

### 2.3.4. Sistemas ambientales, sus cambios, interacciones e impactos sobre la calidad del agua

Se suelen clasificar cinco sistemas ecológicos que sostienen la economía mundial: campos de cultivos y pastizales, bosques, conglomeraciones urbanas, sistemas del aire y sistemas acuáticos. Estos cinco sistemas están interconectados en un balance que es susceptible a corromperse por el uso sobremedido de sus recursos y/o por su pérdida o degradación. Podríamos numerar cientos de ejemplos concretos de esta interconexión, de manera general que sabe que la contaminación atmosférica impacta de manera directa la calidad del agua, la deforestación tiene un efecto enorme sobre los depósitos acuáticos al igual que sobre la atmósfera.

La figura 2-7 ilustra un esquema simplificado de la relación que existe entre los cinco sistemas que sostienen la economía mundial. En este modelo se pueden observar la inmensa interrelación que existe entre cada uno de ellos y algunos procesos de transporte de materia que hacen posible esta conexión.

Probablemente la urbanización es la fuente del cambio más dramático en la calidad del agua debido a los contaminantes y a las interconexiones antes mencionadas. La urbanización transforma la composición atmosférica, la hidrología natural de las cuencas, los depósitos naturales de sólidos y prácticamente todo el ecosistema cambia cuando una ciudad se asienta. Las emisiones residuales incrementan dramáticamente y las fuentes de estos residuos suelen ser muy variadas (Novotny & Olem, 1994).

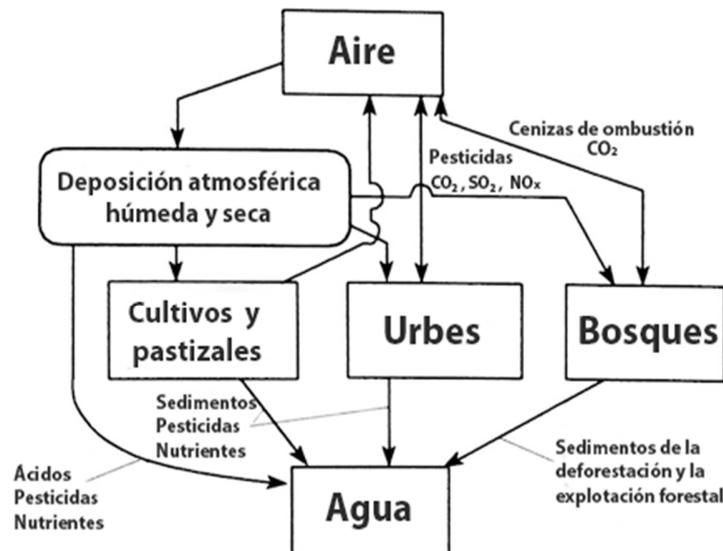


Figura 2-7 Relación de la contaminación entre los sistemas ecológicos económicamente más importantes. Adaptado de (Novotny & Olem, 1994)

### 2.3.5. Fuentes de contaminación en los sistemas de captación de agua pluvial

La contaminación asociada a actividades antropogénicas afecta en mayor o menor medida la calidad del agua en algunas fuentes de abastecimiento. Aquella fuente que toma importancia en este documento es el agua de lluvia. Es por esto que a partir de esta sección nos enfocamos en mayor medida en los efectos de la contaminación sobre el agua pluvial.

Se han encontrado diversos tipos de contaminantes químicos en el agua de lluvia recolectada en sistemas de captación de agua de lluvia, incluidos metales pesados (Förster, 1999) (Lee, Yang, Han, & Choia, 2010) hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs) (Förster, 1999), pesticidas (Zobrist, y otros, 2000) y herbicidas (Bucheli, Müller, Voegelin, & Schwarzenbach, 1998). También se ha reportado encontrar contaminación biológica: coliformes fecales, otras bacterias potencialmente patógenas y protozoos (Ahmed, Huygens, Goonetilleke, & Gardner, 2008).

El tipo de material del que está construida la superficie de captación (techo) es en la mayoría de los casos la fuente principal de contaminantes que afectan la calidad del agua captada. En un estudio, (Nicholson, Clark, Long, Spicher, & Steele, 2009) compararon la calidad del agua de lluvia recolectada entre seis tipos de techo: metal galvanizado, batido de cedro, tejas de asfalto, dos tipos de madera tratada y un techo verde (es decir, con vegetación). Como resultado del estudio se encontró que el metal galvanizado, las tejas de asfalto y los techos verdes neutralizaron la acidez del agua de lluvia en mayor medida que los otros. Las maderas tratadas dejaron en el agua concentraciones de cobre más altas y el metal galvanizado produjo las concentraciones más altas de zinc. Se sabe también que los techos de tejas de cadmio y asfalto son una fuente de plomo particulado y algunas veces de mercurio (Van Metre & Mahler, 2003).

Las fuentes de contaminación que afectan el agua en los sistemas de captación pueden clasificarse como **puntuales y no puntuales**.

Las fuentes de contaminación puntuales son definidas por la manera en que los contaminantes afectan a un sistema, en general lo hacen de manera discreta, con una localización identificable y comúnmente pueden ser medidos con relativa facilidad (Novotny & Olem, 1994), tal es el caso de:

- Efluentes municipales e industriales de aguas residuales.
- Ecurrimientos de lixiviados desde depósitos de residuos sólidos.
- Ecurrimientos e infiltración de agua desde criaderos de animales.
- Ecurrimientos desde zonas industriales que no están conectadas al alcantarillado.
- Desagüe de alcantarillado pluvial en centros urbanos cuya población sea mayor a 100 000 hab.
- Desbordamiento de alcantarillado mixto.
- Ecurrimiento y drenaje de minas superficiales o profundas, también de pozos petroleros.
- Ecurrimientos de construcciones que sobrepasan las 2 hectáreas (20 000 m<sup>2</sup>).

Las fuentes no puntuales de contaminación son difusas, de difícil identificación, intermitentes y frecuentemente asociadas al uso del suelo (Novotny & Olem, 1994). Algunos ejemplos son:

- Retorno de flujo desde sitios de irrigación para agricultura.
- Otros escurrimientos e infiltraciones desde la agricultura y silvicultura.
- Escorrentía urbana de áreas no encamadas.
- Escorrentía de sitios de construcción pequeños y dispersos.
- Fosas sépticas que surgen en áreas donde fallan los sistemas de alcantarillado y la lixiviación de efluentes sépticos.
- Deposición atmosférica húmeda y seca sobre una superficie de agua (incluida la lluvia ácida).
- Flujo desde minas abandonadas, incluyendo carreteras inactivas, taludes y terraplenes.
- Actividades en áreas que generan desechos y contaminantes, tales como:
  - Deforestación y tala.
  - Drenaje y destrucción de humedales.
  - Canalización de arroyos, construcción de diques, presas, calzadas e instalaciones de desviación de flujo en aguas navegables.
  - Construcción y modificación del paisaje.
  - Transporte interurbano.
  - Maniobras de entrenamiento militar.
  - Recreación masiva al aire libre.

### 2.3.6. Interdependencia entre el aire y la calidad del agua

La atmósfera es la porción del medio ambiente donde se originan los mayores problemas de contaminación difusa; es un hecho que la magnitud de la contaminación difusa puede ser correlacionada directamente con la contaminación ambiental. Las emisiones de dióxido de azufre y óxidos de nitrógeno por el uso de combustibles fósiles, erupciones volcánicas y tránsito vehicular causan el fenómeno de lluvia ácida, que puede tener efectos severos sobre algunos cuerpos de agua alrededor del mundo: acelera la lixiviación de los cationes básicos como el aluminio, el calcio y el magnesio, que ayudan a contrarrestar la acidificación de los suelos en áreas sensibles al ácido. Los suelos forestales pueden acumular sulfatos y nitratos depositados desde la atmósfera y el agua puede contener concentraciones altas de aluminio debido a la lluvia ácida (Likens, 2013).

Partículas aéreas en la atmósfera contienen cantidades apreciables de sulfuros, metales tóxicos, pesticidas y otros compuestos tóxicos orgánicos, hongos, polen, cenizas, nutrientes, alquitrán; y una variedad enorme de compuestos químicos, tales como óxidos, nitritos, nitratos, cloruros, fluoruros, fluoro carbonatos, ozono y silicatos (Novotny & Olem, 1994).

Los efectos adversos de la deposición de emisiones inducidas por el hombre han sido reconocidos desde hace más de un siglo, en *“Aire y lluvia: principios de la química climatológica”* de 1872, Robert Angus Smith escribe sobre tres tipos de aire alrededor del centro industrial de Manchester,

Inglaterra: “Aquel con carbonato de amonio  $(NH_4)_2CO_3$  en los campos cercanos, aquel con sulfato de amonio  $(NH_4)_2SO_4$  en los suburbios y aquel con ácido sulfúrico  $H_2SO_4$  en el centro.”.

Muchos estudios cubren campos específicos de contaminación: agua o aire. Pero son pocos los que asocian la calidad del agua con la del aire. Aun así, hay varios ejemplos en los que la interdependencia entre agua y aire son tomados con gran importancia. La figura 2.8 ilustra la interdependencia entre la calidad del agua y el aire (Novotny & Olem, 1994).

Millones de toneladas de metales tóxicos y sustancias orgánicas son descargadas anualmente al aire debidas a la industria y la actividad humana. Un hecho importante es que las fuentes de contaminación del aire son globales, pues los contaminantes emitidos pueden viajar distancias muy grandes y su deposición ocurre de forma local y global (Novotny & Olem, 1994).

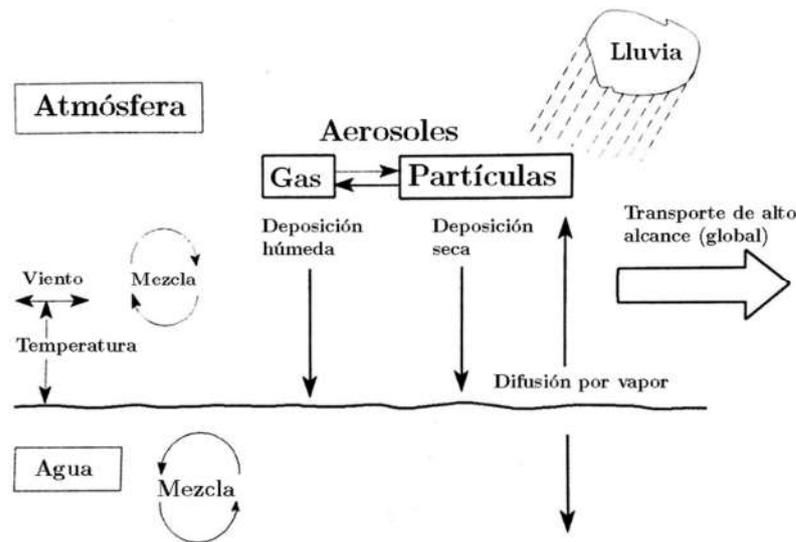


Figura 2-8 Interacción física y química de los procesos entre agua-atmósfera.  
Fuente: adaptado de (Novotny & Olem, 1994)

### 2.3.7. Transporte global de contaminantes

Medidas en puntos remotos de la tierra indican que algunos contaminantes, como químicos orgánicos se depositan en cantidades apreciables en cualquier lugar de la tierra (Kelly, 1994)

La concentración de los contaminantes en la atmósfera está determinada por el balance de masas entre las fuentes globales de contaminantes y su descenso. Matemáticamente se puede escribir que (Jung, 1977):

$$\frac{dM}{dt} = Q - S(M) \quad \text{ec. (2.14)}$$

donde:

- M = la masa de contaminantes globales en la atmósfera.
- Q = la fuente mundial de permanencia del contaminante.
- S(M) = la caída mundial del contaminante.

Si se asumen condiciones de equilibrio, que pueden ser aplicadas sólo en intervalos de más de un año, y con estradas estables, el lado izquierdo de la ecuación 2.12 se vuelve cero y:

$$Q_{ss} = S(M) \quad \text{ec. (2.15)}$$

El descenso de contaminantes atmosféricos incluye:

1. Deposición húmeda y seca sobre la tierra y mar
2. Adsorción sobre el suelo y las superficies marinas
3. Descomposición por procesos químicos y fotoquímicos de la atmósfera.
4. Emisiones a la estratosfera.

La razón de remoción de contaminantes a nivel global es una función de la masa de contaminantes presentes en la atmósfera, es decir, su concentración. Si la deposición se estudia en casos de componentes relativamente inertes (DDT y PCB), se puede modelar aproximadamente como:

$$S(M) = (v_d)(C_M) \quad \text{ec. (2.16)}$$

donde:

$v_d$  = velocidad de deposición

$C_M$  = promedio global de la concentración del contaminante, usualmente medida en puntos lejanos de las emisiones.

El tiempo de permanencia promedio de un contaminante en la atmósfera en condiciones estables está dado por:

$$T = \frac{M}{S(M)} = \frac{C_M V_A}{v_d C_M A_G} = \frac{H}{v_d} \quad \text{ec. (2.17)}$$

donde:

$A_G$  = superficie global

$V_A$  = volumen de la capa de mezcla atmosférica

$H$  = altura promedio de la superficie de la capa límite (usualmente alrededor de 1000m)

Si el ingreso de un contaminante hacia el sistema de transporte global es instantáneo, como ocurren en las explosiones, erupciones volcánicas y otros eventos similares, y aunado a ello, la función de caída es linealmente proporcional a la masa del contaminante en la atmósfera ( $S(M) = S_o M$ ) la ecuación 2.12 podría resolverse de la siguiente forma (Novotny & Olem, 1994):

$$M(t) = \frac{Q_o}{V_A} e^{-S_o t} = \frac{Q_o}{V_A} e^{-t/T} \quad \text{ec. (2.18)}$$

donde:

$Q_0$ =la masa de la entrada instantánea

El proceso natural más efectivo para la remoción de contaminantes es la aglomeración de los agentes contaminantes hacia aerosoles (partículas suspendidas) y su subsecuente remoción por su caída seca o húmeda sobre el suelo o el mar. El término aerosol debe ser diferenciado de “polvo”, el polvo atmosférico contiene partículas que son en su mayoría insolubles, mientras que los aerosoles contienen también materiales solubles en agua (cerca de 50 según Paterson y Junge).

La remoción de partículas de polvo y aerosoles de la capa atmosférica es debido a (Kelly, 1994):

- Deposición seca por sedimentación
- Remoción por lluvias o nevadas.
- Deposición seca debido a su impacto con vegetación o superficies rugosas

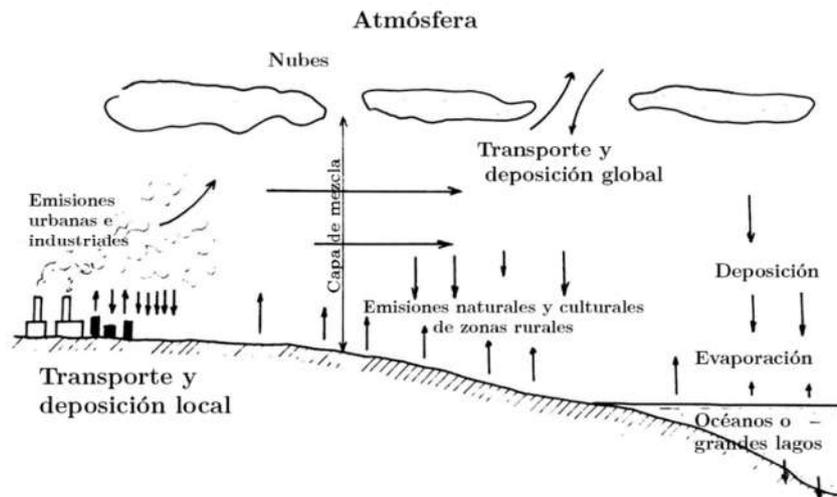


Figura 2-9 Fuentes locales y globales de la deposición atmosférica Fuente: adaptado de (Novotny & Olem, 1994)

### 2.3.8. Deposición seca

Es un importante proceso de remoción de gases y partículas suspendidas. Se ha encontrado que, descontando las zonas urbanas, la deposición seca de los sulfatos está estimada en un 30% a 60% del total, y bajo las mismas condiciones, los compuestos de nitrógeno decantan por este proceso un 30%-70% del total.

La razón de caída en seco de partículas desde la atmósfera está determinada mayormente por la fuerza de gravedad, pero otros efectos como el choque con alguna superficie, atracción electrostática, adsorción e interacciones químicas pueden explicar por qué la deposición de partículas del orden de 1µm o menos hacia el suelo, suele ser mayor que la esperada debida a la atracción gravitacional (Kelly, 1994)

Esta razón puede relacionarse con la concentración promedio sobre la superficie (Novotny & Olem, 1994):

$$D_a = v_d C(x, y, z) \quad \text{ec. (2.19)}$$

donde:

- $D_a$  = cantidad de aerosoles removidos por unidad de área sobre tiempo (ej: ton/(km<sup>2</sup>))
- $C(x,y,z)$  = concentración promedio de aerosoles en las posiciones x,y,z desde la fuente o coordinada de origen
- $v_d$  = velocidad de deposición de la partícula (ej. m/día)

### 2.3.9. Deposición húmeda

Debido a que el lavado de la atmósfera por precipitación es el proceso más efectivo para retirar contaminantes, la lluvia y la nieve contienen una cantidad grande de contaminantes, tal vez en cantidades perjudiciales para los diferentes ecosistemas terrestres y marinos.

Los contaminantes que se adquieren en la precipitación son ácidos, pesticidas, metales pesados, químicos orgánicos, fosfatos y compuestos de nitrógeno. En algunas áreas, la contaminación que llega desde la precipitación ha sido devastadora para la biota acuática superficial, y a menudo ayuda a la acidificación de los lagos, lo que provoca la muerte de peces y una severa reducción en la productividad del lago. La lluvia ácida también puede liberar cationes de los suelos, como el aluminio, y de la infraestructura urbana, causando daños al concreto y corroyendo los metales (Kelly, 1994).

La contaminación puede incorporarse a la precipitación desde las nubes o debajo de ellas. Cuando se origina en las nubes se denomina *rainout* o *snowout* dependiendo del tipo de precipitación que se presenta. Cuando la contaminación se adquiere en el camino que pasa para llegar al suelo, se le denomina de “lavado” o *washout*.

La función por lavado (*washout*) puede ser estimada conociendo las concentraciones atmosféricas, porque las concentraciones de la contaminación originada en las nubes son desconocidas o inverosímiles. El proceso de barrido es básicamente una función exponencial (Slade, 1968)

$$c_w = C_{w,0} e^{-\lambda t} \quad \text{ec. (2.20)}$$

donde:

- $C_w$  = la concentración atmosférica del contaminante antes de la lluvia.

- $C_{(w,0)}$  = la concentración atmosférica del contaminante después de la lluvia.  
 $t$  = duración de la lluvia.  
 $\lambda$  = coeficiente de lavado o de “washout”.

la caída húmeda por unidad de área es entonces:

$$D_w = (C_{w,0} - C_w)H = C_{w,0} = (1 - \exp(-\lambda t))H \quad \text{ec. (2.21)}$$

De donde  $H$  es la profundidad de la atmósfera donde el contaminante está posicionado. La magnitud del coeficiente  $\lambda$  está en el orden de  $10^{-4} \text{ s}^{-1}$  y es una función de la intensidad de lluvia. La magnitud de  $\lambda$  es similar para gases y partículas.

### 2.3.10. Lluvia ácida

Toda la lluvia, por naturaleza, tiene algo de acidez debido a su interacción con el dióxido de carbono atmosférico formando una solución débil de ácido carbónico ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ), que resulta ser el principal mecanismo de acidificación de la lluvia y normalmente de alcanza un pH de alrededor de 5,6.

Como resultado, una precipitación con un pH inferior a 5.6 es considerada como lluvia ácida. En algunas partes del mundo, la acidez del agua de lluvia es considerablemente menor que 5.6, principalmente por la emisión de óxidos de azufre y de nitrógeno ( $\text{SO}_2$  y  $\text{NO}_x$ ) formados en la quema de combustibles fósiles. Ya que algunos óxidos de azufre son realmente partículas que pueden sedimentarse sin necesidad de precipitación, la expresión popular «lluvia ácida» sería más descriptiva si dijera deposición ácida (Masters & Ela, 2008).

Los efectos de la deposición ácida sobre la tierra, los ecosistemas terrestres y los acuáticos son conocidos sólo parcialmente, pero algunos rasgos sí que aparecen con bastante claridad. Los ácidos degradan los materiales de construcción, particularmente la piedra caliza, el mármol (una forma de caliza), varios metales comúnmente usados como el acero galvanizado, y ciertas pinturas. De hecho, el incremento de la velocidad de erosión de la superficie de los edificios y monumentos por la intemperie es uno de los principales indicadores del impacto adverso de la lluvia ácida. Los ecosistemas terrestres, especialmente bosques, parecen experimentar un estrés considerable en respuesta a la deposición ácida, con reducciones en el crecimiento y aumento de la mortalidad, especialmente acusadas en zonas del este de los Estados Unidos, este de Canadá y norte de Europa (Masters & Ela, 2008).

## 2.4. Captación de agua pluvial

### 2.4.1. Historia de la captación de agua pluvial

Al ubicarse históricamente en los comienzos de las civilizaciones humanas se empieza a visualizar el suministro de agua como un problema que las civilizaciones debieron resolver las poblaciones para su supervivencia. La respuesta casi inmediata, lógica y en muchos casos asequible: tomar agua de los ríos y lagos cercano. Ubicar una población cerca de estos ríos y lagos fue fundamental para el desarrollo de la agricultura, y con ella el cambio hacia una vida sedentaria y más organizada.

Antes de las grandes obras de infraestructura hidráulica, un salto intermedio y lógico para algunas regiones fue el aprovechamiento de agua pluvial. Construyendo sistemas de captación y depósitos para el agua, que desde entonces se creía con propiedades más salubres. La recolección de agua de lluvia fue una práctica muy antigua y ha existido en todo el mundo.

Incluso los romanos llegaron a desarrollar una estrecha relación entre sus sistemas de captación de agua de lluvia y sus diseños arquitectónicos.

Para mejorar la captación de agua pluvial se comenzaron a construir *aberturas* cuadrangulares llamadas *compluvium*, donde caía el agua proveniente de distintos tejados siendo recolectada en estanques normalmente construidos en piedra o mármol y usados también como decoración del atrio. En este lugar el agua reposaba para que las impurezas arrastradas a lo largo del tejado se depositaran en el fondo.

Lejos del imperio romano, en el Desierto de Negev, que comprende territorios de los actuales Israel y Jordania, han sido descubiertas ruinas de presumibles sistemas de captación de hace más de 4,000 años. Sistemas que consistían en el corte de taludes para enfocar la escorrentía superficial y dirigir las aguas captadas hacia predios agrícolas en zonas bajas.

También en la península de Yucatán se han encontrado indicios de infraestructura para el aprovechamiento pluvial (Figura 2-11) que se dejaron de usar debido a la invasión española y la llegada

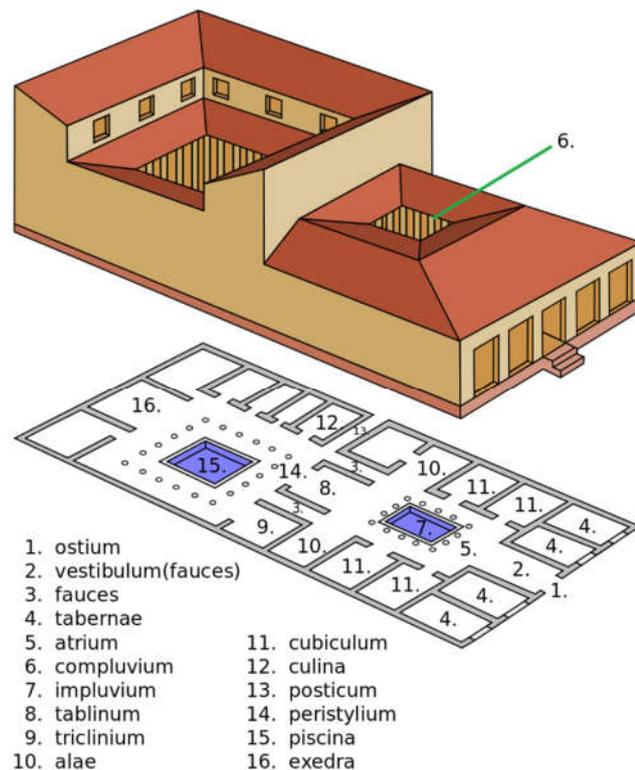


Figura 2-10 Esquema arquitectónico de las casas romanas que contaban con un sistema de captación de agua de lluvia (Litaudon, 2002).

de nuevas técnicas de abastecimiento de agua: presas, acueductos, pozos de extracción y sistemas de irrigación. Situación casi repetida en la India tras la colonización inglesa.

En Cerros, una ciudad del actual Belice, en el año 200 d.C. los habitantes cavaron canales y depósitos para administrar el agua de lluvia con lo que permitían que la gente permaneciera en la zona durante la estación seca cuando escaseaba el agua (García Velázquez, 2012).

En Francia, el aprovechamiento pluvial estuvo muy extendido hasta el siglo XIX, sin embargo, con la llegada de las redes de agua potable casi ha desaparecido en la actualidad, esta extinción de la práctica de captar el agua pluvial in situ ha ido desapareciendo no solo en Francia, sino en todo el mundo, exceptuando los lugares aislados en donde las redes de agua potable aún no han llegado.

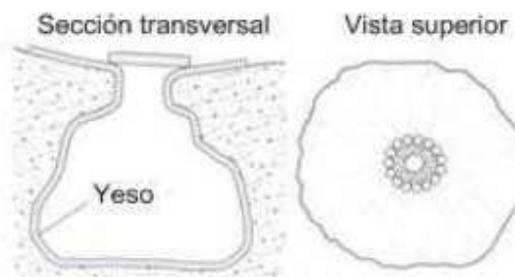


Figura 2-11. Chultun maya, depósito subterráneo impermeabilizado con yeso para almacenar agua de lluvia (Gould y Nissen-Petersen, 1999)

#### 2.4.1. Sistemas de captación de agua pluvial en la actualidad

La red de saneamiento y de distribución de agua potable en la forma actual se popularizó en el siglo XIX, originalmente el uso de la red de saneamiento era usada para llevar los desechos humanos y el agua pluvial lejos de las zonas urbanas, donde no pudiera ser un problema para la salud de los pobladores, sin embargo con el tiempo estas prácticas han tenido problemas, pues llegaron a afectar zonas aledañas, causando impactos ambientales que no se tuvieron en cuenta en el momento de la planeación.

El suministro de agua potable tiene otros problemas; las ciudades y sus pobladores han terminado por adoptar una lógica de lejanía con el agua y su tratamiento; y en estos momentos, los sistemas de abastecimiento están siendo cuestionados por los problemas que tienen las redes causados por la rápida urbanización, el envejecimiento y degradación de la infraestructura, la pérdida de más del 20% del volumen de agua distribuido y el aumento consistente en el precio por metro cúbico del agua potable (que incluye servicios de saneamiento) (UNESCO, 2010).

Además de los problemas propios de los sistemas de infraestructura, se agregan otras problemáticas generalizadas desde la entrada al siglo XXI: Los conflictos ambientales que afectan profundamente el campo del agua; pues esta es un recurso vital no reemplazable sujeta a degradación continua. A escala mundial la UNESCO nos da un retrato alarmante de la situación del agua dulce. Basándose en que, en la actualidad, alrededor de 1200 millones de personas no tienen acceso a agua potable (el 20% de la población mundial) y además se estima que más de 5 000 millones

de personas no tendrán acceso a un saneamiento adecuado en 2030 (el 67% de la población mundial)

Dado este contexto, se pueden plantear dos posibles soluciones:

- La primera es institucional y tiene que ver con una gestión integral de los recursos hídricos de cada región.
- La segunda tiene que ver con una la implementación tecnológica de soluciones, que permitan la convivencia entre las formas de abastecimiento tradicionales, técnicas nuevas y la recuperación de las antiguas.

Estas técnicas aparecen como una forma de involucrar a los ciudadanos a interesarse en la gestión urbana del agua; sirve para un doble propósito, en primer lugar, ahorrar agua potable para reducir la extracción de agua dulce y por otro lado luchar contra los problemas de gestión que tiene la ciudad (escasez, contaminación, saturación de la red, inundaciones); causados por los organismos operadores y su deficiente administración.

## 2.5. Los sistemas de captación de agua de lluvia

La *captación de agua de lluvia* se define como la recolección del escurrimiento de una tormenta sobre una superficie para propósitos de aprovechamiento. En la figura 2-12 se muestra una clasificación general del aprovechamiento de la lluvia y los sistemas de captación propuesta por Gould y Nissen-Pettersen en 1999.

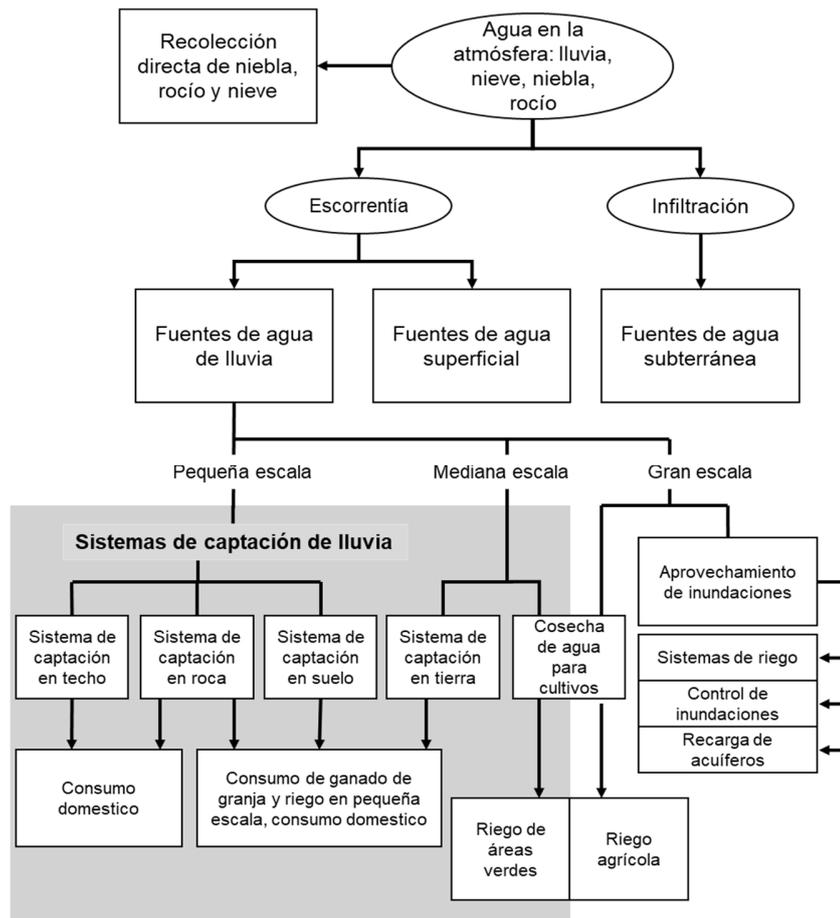


Figura 2-12 Clasificación general del aprovechamiento de agua de lluvia (Gould y Nissen-Pettersen,1999)

Diversas clasificaciones de a captación de agua de lluvia se han propuesto, una de las tantas es la de la FAO, que hace una recopilación por distintas características, ya sea por fuente, por escurrimiento, área, almacenamiento o directamente por el uso que se le va a dar, la tabla 2-3 muestra esta clasificación para la captación de agua de lluvia.

Tabla 2-3 Modificación a la clasificación de las técnicas de recolección de la FAO en el 2000

Clasificación	Ejemplos
Por fuente	Precipitación Niebla Nieve
Por escurrimiento	En terrazas y patios En techos En tierra y campo En roca
Por área o extensión	Grandes extensiones (comunal) Extensiones medianas Extensiones pequeñas (microcaptación)
Por almacenamiento	Cisterna (cemento, plástico, etc.) Tanque (plástico, metálico, etc.) Suelo (roca, suelo impermeabilizado, etc.)
Por uso o aprovechamiento	Animales Humano Agricultura o riego

La micro captación de agua de lluvia está dentro de la clasificación por extensión, es una práctica que se basa en la recolección, el almacenamiento y el uso del agua de lluvia que cae en los techos de las edificaciones. El uso de esta agua captada depende en gran medida de las características finales del agua almacenada. Por ejemplo: para uso doméstico, industrial, agrícola, ganadero e incluso en la preparación de alimentos y bebidas si se trata adecuadamente. También se puede usar como medio de control de inundaciones o como reserva fuego (König, 2001)

Para efectos prácticos, se entiende que cuando se habla de sistemas captación de agua pluvial (SCAP) en este documento, se hace referencia a la micro captación de agua, a menos que se especifique lo contrario.

Un sistema de captación de agua pluvial puede variar entre un simple tanque colocado debajo de una canaleta donde el agua recolectada se usa para regar el césped y un conjunto de aparatos más sofisticados (tanques, filtros, bombas, etc) con el fin de utilizar el agua captada dentro de los edificios; para la alimentación del WC, lavabos o la lavadora (Roebuck, 2007).

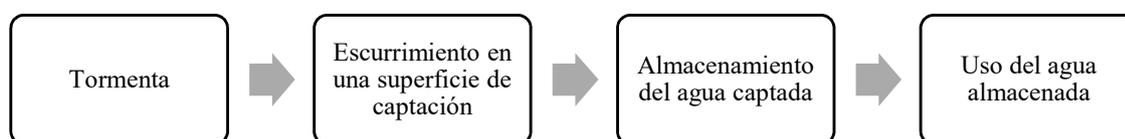


Figura 2-13 El principio general de la captación y utilización de agua pluvial. Adaptado de: (Roebuck, 2007)

### 2.5.1. Composición de los sistemas de aprovechamiento pluvial

De manera muy simplificada, los componentes específicos de un sistema de recolección de agua pluvial se pueden clasificar en dos categorías:

- Los componentes del edificio: El área de recolección y las canaletas.
- Los componentes del sistema de captación: son los componentes ajenos al edificio, que se le agregan para hacer un sistema funcional: almacenamiento, filtros, sedimentadores, separadores de primeras lluvias.

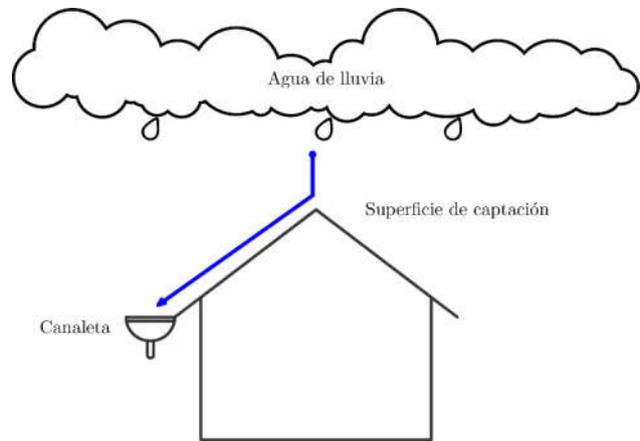


Figura 2-14 Esquema de la captación de agua de lluvia.  
Fuente: adaptado de (Roebuck, 2007)

Sin importar la complejidad de los sistemas de captación, todos comparten al menos los siguientes componentes (Gould & Nissen-Peterson, 1999):

- **La superficie de captación.** Es la superficie sobre la que se va a recolectar el agua de la lluvia. Puede ser natural, como roca o artificial. En este último caso, las superficies pueden ser de materiales como concreto; lámina metálica, plástica, fibra de vidrio; tejas de arcilla, madera y palma u otras hojas. Generalmente estas superficies se usan como trechos por sus características, algunas como las láminas de policarbonato (o cualquier plástico) ofrecen ventajas sobre otras para la captación y aprovechamiento de la lluvia.
- Dependiendo del tipo de material que componga la superficie de captación, se tiene también un coeficiente empírico asociado a la eficiencia del material para la recolección de agua pluvial, conocido como coeficiente de escurrimiento, que es la relación que existe entre la cantidad de lluvia recolectada y la cantidad de lluvia que cae; en otras palabras, es una eficiencia de recolección.

Tabla 2-4 Coeficientes de escurrimiento (Ce) de diferentes materiales en el área de captación.

Material la azotea	Ce	Referencia
Concreto	0.6 - 0.8	(CIDECALLI, 2005)
Geomembrana de PVC	0.85 - 0.90	(CIDECALLI, 2005)
Azulejos teja	0.8 - 0.9	(CIDECALLI, 2005)
Hojas de metal acanaladas	0.7 - 0.9	(CIDECALLI, 2005)
	0.7 - 0.9	(Pacey & Cullis, 1989)
Materiales aleatorios que no están especificados en sus referencias	0.75 - 0.95	(Texas department of transportation, 2009)
	0.85	(Rahman, Dbais, & Imteaz, 2010)
	0.8 - 0.9	(Fewkes A. , 1999)
	0.8 - 0.95	(Ghisi, Tavares., & Rocha, 2009)
Techo de concreto en pendiente	0.9	(Lancaster, 2006)
Techo de láminas metálicas en pendiente	0.95	(Lancaster, 2006)
	0.81 - 0.84	(Lancaster, 2006)
Techo de láminas de aluminio	0.7	(Liaw. & Tsai, 2010)
Techo plano recubierto con berún	0.7	(Lancaster, 2006)
Techo plano recubierto con grava	0.8 - 0.85	(Woods-Ballard. & Malcolm, 2003)
Techo de azulejo en pendiente	0.8	(Woods-Ballard. & Malcolm, 2003)
Techo plano	0.5	(Woods-Ballard. & Malcolm, 2003)
Techo plano recubierto con grava	0.4	(Woods-Ballard. & Malcolm, 2003)
Techo con vegetación	0.3	(Woods-Ballard. & Malcolm, 2003)
Techo con mucha vegetación	0.2	(Woods-Ballard. & Malcolm, 2003)
Techo de azulejo en pendiente	0.75 - 0.90	(Environment Agency(UK), 2007)
Techo liso plano	0.5	(Environment Agency(UK), 2007)
Techo de grava en pendiente	0.4- 0.5	(Environment Agency(UK), 2007)

- **Conducción:** El sistema requiere elementos para transportar el agua colectada hacia el lugar de aprovechamiento, tratamiento o almacenamiento, para lo cual se usan comúnmente canaletas y tuberías que pueden ser de los siguientes materiales:
  - Plásticas: policloruro de vinilo (PVC), polietileno de alta densidad (HDPE) o polipropileno (PP);
  - Metálicas: lámina de acero galvanizada o zinc; y materiales naturales: madera y fibras

Las canaletas se instalan en el perímetro del techo, en donde el agua se acumula antes de hacer al suelo; el material debe ser inerte para evitar contaminar el agua captada. Se sugiere el uso de mallas para evitar el paso de basura, sólidos y hojas.

Los recolectores de agua pluvial se dimensionan considerando una sección llena y en función de la extensión del área de captación. La pendiente para los tramos longitudinales de las canaletas estará entre 1% y 4% siendo recomendable un valor de 2%.

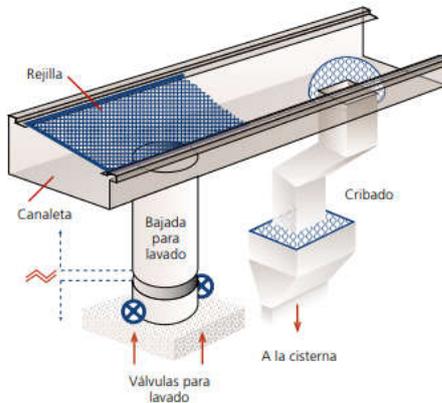


Figura 2-15 Canaletas con rejillas (CONAFOVI, 2005).

- **Almacenamiento:** Es el lugar donde se conservará el volumen agua captada. Las características de este influyen directamente sobre la calidad que mantendrá el líquido antes de su aprovechamiento. Puede ir desde zanjas naturales hasta tanques especiales y los materiales que en que son fabricados suelen ser de concreto armado, botes o cisternas metálicas (lámina de acero) y tinacos o cisternas de HDPE.

#### Otros componentes:

Algunos componentes complementarios que repercuten directamente en la calidad del agua son los siguientes:

- **Filtros para hojas y otros sólidos de gran tamaño.** Se encargan de retirar elementos de gran tamaño que puede arrastrar la lluvia. Algunos de estos filtros se muestran en la figura 2-6
- **Sedimentadores, desarenadores y clarificadores.** Su objetivo es retirar sólidos que pueden sedimentar antes del almacenamiento. Este tratamiento ayuda a hacer más eficiente el filtrado y reducir el mantenimiento general de los tratamientos posteriores.
- **Filtros.** Ayudan a retener sólidos suspendidos y otros que no fueron retenidos en las etapas anteriores. También pueden reducir la contaminación microbiológica. Existen filtros rápidos, lentos, por gravedad y por presión.
- **Dispositivos para desinfección.** Ayudan a eliminar microorganismos y potabilizan el agua colectada. Algunos ejemplos son: sistemas de cloración, lámparas de luz ultravioleta y dosificadores de plata coloidal.
- **Dispositivos de automatización.** Se trata de equipo que ayuda a complementar el sistema en la parte operativa. Las bombas para presurizar la red se incluyen en esta categoría, así como los controladores y sensores que ayudasen a automatizar esta labor.

- **Interceptores o separadores de primera lluvia.** Su objetivo es separar las primeras aguas que escurren y arrastran una mayor concentración de contaminantes de la atmósfera y partículas de la superficie de captación. Hay separadores de lluvia manuales y automáticos.

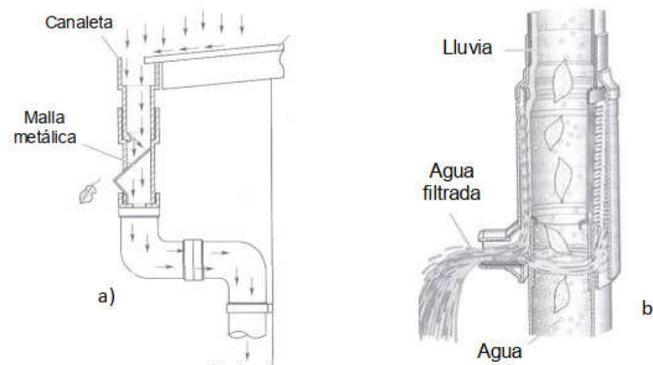


Figura 2-16 Distintos tipos de filtros para hojas. a) por caída vertical b) por centrifugado. Tomado de (Gould y Nissen-Pattersen,1999)

## 2.6. Separadores de primeras lluvias

El agua de lluvia que se recolecta de las fases anteriores pasa a través de un dispositivo de “desviación”; cuya función es la de evitar que el agua, que “lavó” la superficie de captación y los contaminantes presentes en la atmósfera, sea almacenada. Pues, de hecho, después de un largo periodo seco, los techos de los edificios se están contaminando con partículas provenientes de la atmósfera; excremento de aves, hojas de árboles y otros desechos. La concentración de contaminantes disminuye con el tiempo o durante el mismo evento de lluvias (Fewkes A. , 1999).

### 2.6.1. El fenómeno de primer flujo en tormentas urbanas y alcantarillado (*first flush*)

No hay un consenso oficial para nombrar el fenómeno de “*first flush*” en nuestra lengua. Si se traduce literalmente del inglés podemos referirnos a él como “primer flujo”, aunque tiene nombres análogos, como primer escurrimiento, agua de lavado o primer volumen escurrido. En México, a partir de la mercadotecnia se ha adoptado el término “Primeras aguas de lluvia”. Es un término, que, a consideración del autor, es suficientemente claro, pero para efectos de este documento se usará indistintamente “primeras aguas” o “primeras aguas de lluvia”.

Este concepto surge en la literatura sobre el drenaje pluvial urbano, y se extendió a la captación de agua pluvial.

Siendo este el caso, hay un claro consenso en la definición de primer flujo: es la primera parte de del volumen total descargado, que tiene la proporción principal de la carga de contaminantes durante una tormenta (Bertrand-Krajewski, Chebbo, & Saget, 1998).

Algunos autores dejan la definición vaga en términos cualitativos, mientras que otros cuantifican explícitamente su idea del primer flujo.

Uno de los modelos más usados para estudiar el fenómeno es la concentración media del evento (CME)

$$CME = \frac{M}{V} = \frac{\int_0^{t_r} c(t) q(t) dt}{\int_0^{t_r} q(t) dt} \quad \text{ec. (2.22)}$$

Donde  $M/V$  es la relación de la masa total de contaminantes ( $M$ ) y el volumen total de agua que cayó de la tormenta ( $V$ ).  $c(t)$  es la concentración del contaminante en el instante  $t$ ,  $q(t)$  es el flujo de agua en el instante  $t$ , y  $t_r$  es la duración de la tormenta (Sansalone & Buchberger, 1997).

La CME integra la concentración del contaminante completamente durante la duración de la tormenta,  $t_r$ .

La concentración parcial media (CPM) tiene una forma similar, pero calculando la concentración en un tiempo distinto al de la duración de la tormenta completa. Siendo:

$$CPM = \frac{m(t)}{v(t)} = \frac{\int_0^t c(t) q(t) dt}{\int_0^t q(t) dt} \quad \text{ec. (2.23)}$$

Donde  $m(t)$  es la masa transportada en el tiempo  $t$  y  $v(t)$  es el volumen del flujo hasta el tiempo  $t$ .

La gráfica más común que se usa para representar el primer flujo representa una carga normalizada de contaminantes contra un volumen normalizado de lluvia.

De la figura 2.17 la recta  $m(t) = v(t)$  representa un evento que descarga un contaminante de manera constante a lo largo de la tormenta, imagínese como una tormenta de intensidad constante durante toda su duración y una concentración del contaminante igualmente constante durante el tiempo de duración de la tormenta. Saget y colaboradores consideran que toda la curva arriba de la recta  $m(t) = v(t)$ , debe ser considerada como una exhibición el fenómeno del primer flujo; pues si revisamos el comportamiento de una curva de estas características: representa que la fracción de la descarga de contaminantes durante la primera parte de la tormenta es mayor. El área 1, 2 y 3 corresponderían a curvas donde se presenta el efecto de primer flujo. Las curvas que se encuentran en las áreas 4,5 y 6 debajo de la diagonal de  $45^\circ$  no se consideran como representativas de este fenómeno; por el contrario, describen un fenómeno contrapuesto, donde la mayor parte de los contaminantes se lavan al final de la tormenta (Doyle, 2006).

En una tormenta ideal para propósitos de obtener agua de la mejor calidad posible, la distribución de contaminación para una tormenta caerá dentro del área 1, suponiendo que la mayor parte de los contaminantes pueden ser removidos por un pequeño volumen de agua. Esta tormenta maximiza la captación de agua pluvial de buena calidad. El beneficio de normalizar las curvas usando el método de  $m'(t)$  contra  $v'(t)$  es que este análisis normaliza la masa de contaminantes y la duración de la tormenta, haciendo que eventos distintos sean comparables entre sí para determinar el comportamiento del flujo de contaminantes (Doyle, 2006).

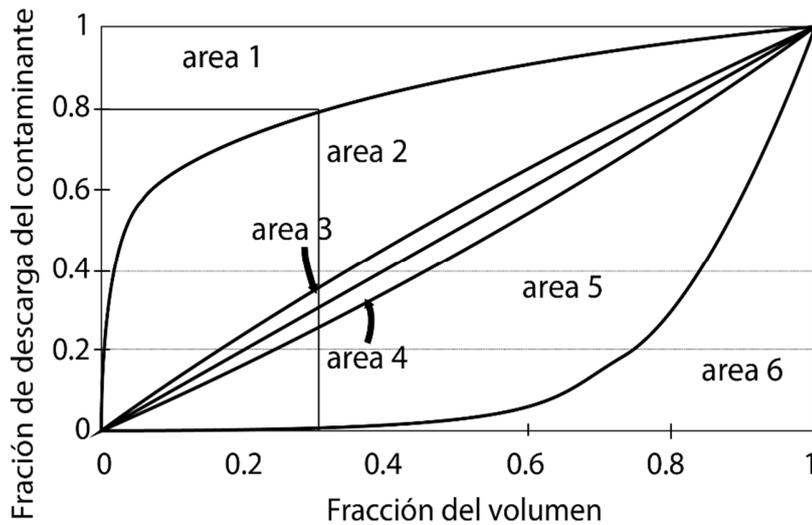


Figura 2-17 Gráfica M(V), descarga acumulada contra volumen total (Saget, Chebbo, & Bertrand-Krajewski, 1996)

Una propuesta para acotar el fenómeno de primer flujo de agua de lluvia es cuando al menos el 80% de los contaminantes son transportados por el 30% de agua, representada por el área 1 en la figura 2-17 (Saget, Chebbo, & Bertrand-Krajewski, 1996). Sin embargo, los autores advierten que **este método es arbitrario**, pero define bien lo que es el fenómeno de primer flujo. Bertrand-Krajewski también usa la gráfica M(V) de la figura 2-17 y dice que la magnitud del primer flujo puede ser determinada de medir la diferencia entre  $m'(t) = v'(t)$  y la curva específica de un evento (Sansalone & Buchberger, 1997) registran tres referencias que aplican tres reglas distintas para definir lo que es el primer flujo. También usan la relación entre  $m'(t)$  y  $v'(t)$ :

$$m'(t) \geq v'(t) \forall t \quad (\text{Helsel, y otros, 1979}) \quad \text{ec. (2.24)}$$

$$m'(t) \geq 0.50 \text{ para } v'(t) \leq 0.25 \quad (\text{Wanielista \& Yousef, 1993}) \quad \text{ec. (2.25)}$$

$$m'(t) \geq 0.80 \text{ para } v'(t) \leq 0.20 \quad (\text{Stahre \& Urbonas, 1990}) \quad \text{ec. (2.26)}$$

Otros investigadores han aportado sus propias maneras de ver el fenómeno, (Deletic, 1998) define el primer flujo:  $FF_{20}$ , como el volumen de contaminantes lavados por el primer 20% del volumen de lluvia, y nos dice que sólo si más del 20% del volumen total de contaminantes son lavados en

este volumen de lluvia, entonces se presenta el fenómeno de primer flujo. La presencia o ausencia del fenómeno es dependiente del contaminante de interés. Deletic encontró que los sedimentos suspendidos hacen que se presente el fenómeno en algunos eventos de lluvia, pero el pH, la conductividad y la temperatura no suelen presentar un comportamiento de primer flujo (Deletic, 1998). Geiger encontró que el 25% de los eventos presentan este fenómeno. Cabe resaltar que todos estos estudios, aunque son útiles para conocer el principio del fenómeno de primeras aguas de lluvia, no son completamente aplicables a los sistemas de captación de agua de lluvia en techos urbanos, pues estos sistemas tienden a ser mucho más pequeños que el drenaje urbano, y el tiempo de retención es mucho más corto. Así mismo, los techos suelen tener mejores condiciones que el pavimento urbano, lo que magnifica el fenómeno de primer flujo.

### 2.6.2. Primer flujo en la captación urbana de agua pluvial

El rendimiento de un sistema de separación de primeras aguas depende de los procesos físicos involucrados en la acumulación de material en el techo en el flujo de agua y material contaminante que fluye a través del sistema. La figura 2-18 resume la interacción del flujo de agua y de materia que interactúan con el dispositivo de separación y el tanque de almacenamiento.

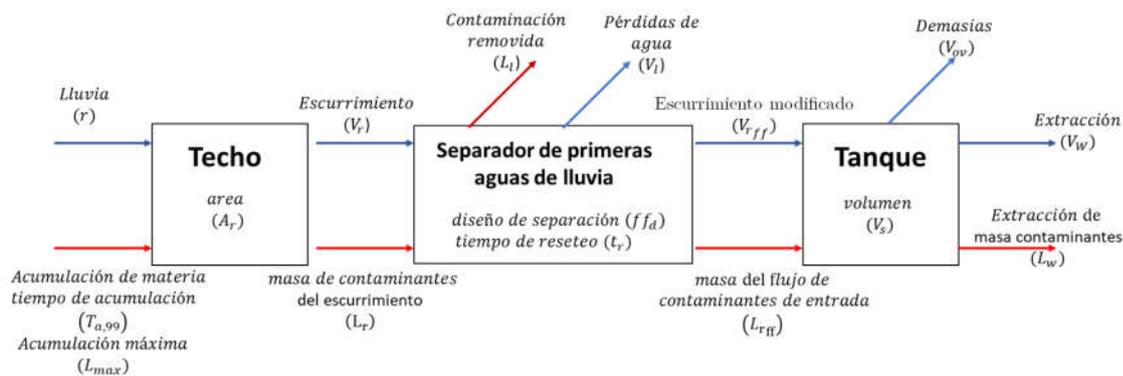


Figura 2-18 Flujo de materia a través de un sistema de separación de primeras lluvias.

Se acumula materia sobre el techo con el paso del tiempo.

1. Durante la tormenta, la lluvia cae en el tejado y recolecta la materia acumulada, que a su vez se mezcla con el agua. Entonces el escurrimiento de agua ( $V_r$ ) y los contaminantes del tejado ( $L_r$ ) fluyen hacia el dispositivo separador de primeras aguas.
2. El separador de primeras aguas separa una cantidad de lluvia dependiendo de su volumen y permite que el excedente entre al tanque. El volumen separado ( $ff_d$ ) representa lo máximo que puede lavarse hasta que la lluvia cese; posteriormente el separador desfogará lentamente esa agua; por lo que cabe la posibilidad que para la siguiente lluvia el dispositivo no esté completamente vacío. Como resultado, la separación de primeras aguas mejora con un periodo seco alcanzando condiciones óptimas en el tiempo que tarda en desfogarse o reestablecerse el dispositivo ( $t_r$ ).

3. Una vez que el dispositivo separador de primeras aguas de lluvia haya separado la cantidad adecuada de agua, el escurrimiento ya puede entrar al tanque de almacenamiento. Siendo así, el volumen captado ( $V_{rf}$ ) se reducirá y en consecuencia también reducirá el flujo de contaminantes ( $L_{rf}$ ) enviado al tanque de almacenamiento
4. Finalmente, el agua es extraída junto con los contaminantes que llegasen a quedar, ya sea para su uso o por la obra de demasías.

#### Proceso físico.

El proceso de lavado de contaminantes está bien descrito como una decadencia exponencial, modelado por (Sartor & Boyd, 1972) como una función basada en asumir que el cociente de material lavado de una superficie es proporcional a la cantidad de material presente y a la intensidad de lluvia.

$$L = L_0 e^{-L_w r t} \quad \text{ec. (2.27)}$$

de donde:

- L = la carga de contaminantes, por sí misma determina la turbiedad del escurrimiento.
- $L_0$  = la carga inicial de contaminante disponible para lavar por la tormenta
- $k_w$  = una constante de lavado ( $\text{mm}^{-1}$ )
- r = la intensidad de lluvia ( $\text{mm/h}$ ) asumiendo que es constante durante toda la tormenta de duración t(h)

Se observa que, en este modelo, el fenómeno depende de la intensidad de lluvia, sin embargo (Martinson & Thomas, 2005) sugieren que puede simplificarse si asumimos que el lavado no depende de la intensidad de lluvia, por supuesto esto es una simplificación aproximada para hacer los análisis prácticos, por lo tanto:

$$L = L_0 e^{-L_w r_a} \quad \text{ec. (2.28)}$$

de donde:

- L = masa remanente de contaminantes.
- $L_0$  = la masa inicial de contaminantes disponibles.
- $k_w$  = una constante de lavado ( $\text{mm}^{-1}$ ).
- $r_a$  = precipitación acumulada en mm.

#### Acumulación de material

Como se detalló en las secciones 2.3.6 – 2.3.8 la acumulación en los techos (y en general de cualquier superficie) depende del fenómeno de deposición de contaminantes. Por lo tanto, la masa de contaminantes en los techos depende:

- De la deposición de contaminantes

- De la remoción de estos contaminantes por fenómenos como viento o tormentas.

Shaheen (1975) propone un modelo donde la deposición es lineal y la remoción de estos sigue el mismo principio que la de primer flujo:

$$L = L_{max}(1 - e^{-k_a t_a}) \quad \text{ec. (2.29)}$$

donde:

L = masa remanente de contaminantes.

$L_{max}$  = la masa máxima de contaminantes que puede tenerla superficie, es decir, el balance entre deposición y remoción.

$k_a$  = constante de acumulación ( $h^{-1}$ )

$t_a$  = por simplicidad se puede usar  $t_a$  como el tiempo de acumulación requerido para que se acumule una fracción de  $L_{max}$ . Por ejemplo,  $t_{a,90}$  sería el tiempo necesario para que se acumule el 90% de  $L_{max}$

### 2.6.3. Tipos de separadores de primeras aguas de lluvia

Si el agua de lluvia de los primeros flujos no se almacena, es decir: se manda en otra dirección, el agua almacenada tiene una mejora significativa en su calidad.

Fewkes hace una distinción para clasificar los separadores de primeras lluvias de acuerdo con su funcionamiento elemental. En la figura 2-7 se muestran los distintos tipos de funcionamiento elementales que Fewkes maneja. **La desviación por intercepción** se basa en la separación del primer flujo separando un volumen invariable de agua a través de un receptáculo y una válvula Check (generalmente una esfera).

**La desviación por divergencia** (o por diversificación). al igual que la desviación por intercepción separa un volumen de agua, sin embargo, se basa en una entrada de agua pluvial y dos salidas, una principal, con una salida de gran área, y otra salida con un área significativamente



Figura 2-19 Funcionamiento básico de un separador de primeras aguas de lluvia. Adaptado de (Belmeziti, 2012)

más pequeña, de modo que la evacuación a través de esta salida será varias veces menor al gasto de entrada de agua, haciendo un cuello de botella y obligando al agua (después de un tiempo) a salir por la salida principal.

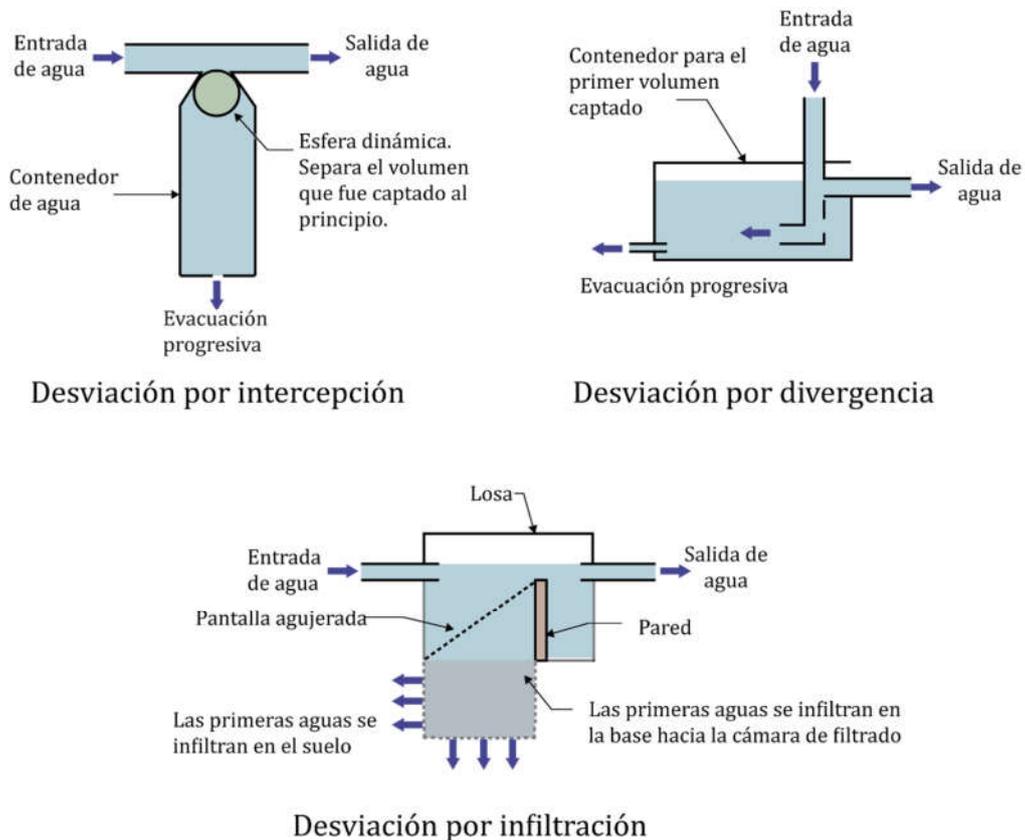


Figura 2-20 Tipos de separadores de primeras aguas de lluvia actuales. Adaptado de (Belmeziti, 2012)

La desviación por infiltración no es más que una separación de las primeras lluvias a través de la sedimentación de las partículas más grandes que esta contenga, y su posterior infiltración en el subsuelo.

Puede presentarse el caso, de que la separación manual sea tomada como un método también

#### 2.6.4. Sistemas húmedos y secos.

Los sistemas secos son aquellos diseñados para que el agua no se acumule en las tuberías. En ellos, el agua de lluvia va directamente del tejado al tanque, por lo que después de la tormenta, las tuberías quedan secas en un lapso corto de tiempo. Este tipo de sistemas previenen que el agua se estanque y se produzcan larvas de mosquitos.

Los “sistemas húmedos” son aquellos en los que el agua recorre un camino por debajo del tanque de almacenamiento, para posteriormente subir hacia el tanque. En ellos, el agua se acumula en las cotas bajas del sistema, por lo que queda agua remanente en la tubería durante un periodo de

tiempo considerablemente más largo. Este tipo de sistemas no son convenientes, pues el agua estancada se vuelve un hábitat para mosquitos y microorganismos. Los sistemas húmedos pueden ser convertidos a secos mediante el uso de separadores de agua subterráneos.

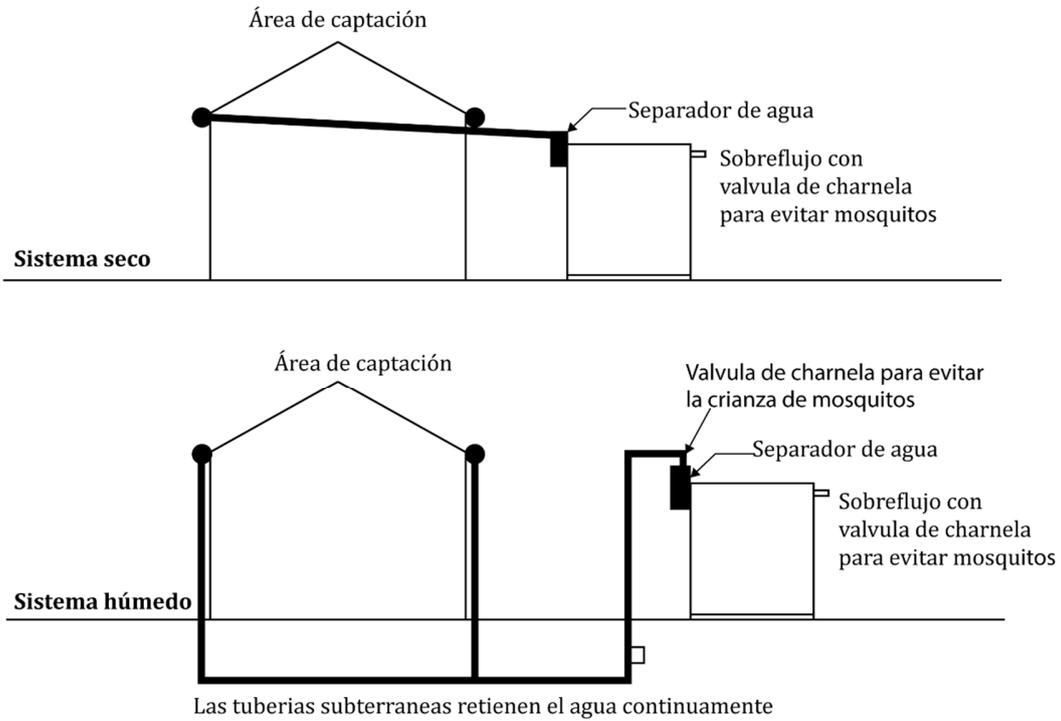


Figura 2-21 Sistemas húmedo y seco. Adaptado de (ATA, 2010)

# 3 Estado del arte de los separadores de primeras lluvias

---

“Cuando trates con el agua consulta primero la práctica, y luego la teoría.”

Leonardo da Vinci

## 3.1. Dispositivos separadores de primeras lluvias actuales

Los dispositivos más comercializados son aquellos que funcionan bajo el principio de intercepción, las únicas diferencias son de materiales, cambios sencillos en el diseño y la marca bajo la que se comercializan.

### 3.1.1. Dispositivos comerciales al rededor

**País: Australia**

**Empresa: Blue Mountain Co.**

**Nombre del producto: First Flush Post/Wall**

---

La separación es por el método de intercepción. El volumen está contenido en una tubería. Se soporta por una base metálica.

Ventajas:

- Fácil instalación.
- Sin partes mecánicas
- Fácil monitoreo debido a un visor transparente.
- Bajo mantenimiento.

Desventajas:

- La válvula de desfogue no es regulable.
- El volumen depende del tamaño de la tubería.
- No se tiene un control adaptable del volumen de agua que se quiere separar.



Fuente:  
(Blue Mountain Co,  
2018)

**País: Australia**

**Empresa: Blue Mountain Co.**

**Nombre del producto: In-Ground First Flush**

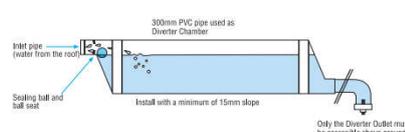
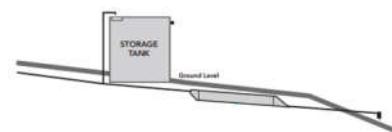
Está diseñado para enterrar el dispositivo; Escala en volumen captado con el uso de más dispositivos. La separación es por el método de intercepción.

Ventajas:

- No ocupa espacio visible en el sistema.
- Puede tenerse un dispositivo de grandes dimensiones sin interferir con la arquitectura de la casa.
- Convierte un sistema húmedo en uno seco.

Desventajas:

- La instalación no es tan sencilla.
- El mantenimiento es difícil.
- No se puede monitorear fácilmente el estado del dispositivo.



Fuente:  
(Blue Mountain Co, 2018)

**País: Australia**

**Empresa: Blue Mountain Co.**

**Nombre del producto: First Flush Advanced**

Está diseñado para tener un mayor control sobre el agua que se separa. Una electroválvula regula el periodo con el que se descarga el agua separada. Esta electroválvula tiene un gasto muy pequeño. La separación es por el método de intercepción.

Ventajas:

- Fácil instalación.
- Mantenimiento fácil y no frecuente.
- Es posible configurar la válvula de desfogeo.

Desventajas:

- El volumen de separación sigue siendo limitado.
- El gasto de salida no es grande, por lo que durante un evento no sirve de nada que la válvula sea configurable.



Fuente:  
(Blue Mountain Co, 2018)

**País: Australia**

**Empresa: Blue Mountain Co.**

**Nombre del producto: First Flush Downpipe**

---

La separación es por el método de intercepción. El volumen está contenido en una tubería transparente. La válvula de desfogue no es regulable.

Ventajas:

- Fácil instalación.
- Mantenimiento fácil y no frecuente.

Desventajas:

- El volumen de separación está limitado a las dimensiones del dispositivo.



Fuente:  
(Blue Mountain Co,  
2018)

**País: Nueva Zelanda**

**Empresa: Marley**

**Nombre del producto: Downpipe Diverter**

---

El producto *Downpipe Diverter* es instalado en la tubería que conduce el agua del techo a almacenamiento; consiste en un brazo de PVC adaptado a una tubería. El brazo actúa como obstáculo y redirige el flujo, impidiendo su entrada al sistema.

Ventajas:

- El espacio que ocupa es mínimo.
- Es de fácil instalación y nulo mantenimiento.
- Control sobre el volumen

Desventajas:

- Es muy propenso a errores humanos, que afectarían la calidad del agua almacenada.
- No es totalmente hermético, aunque en un volumen mínimo, hay filtraciones hacia el sistema.



Fuente:  
(Marley, 2018)

**País: Reino Unido**

**Empresa: Freeflush**

**Nombre del producto: 3P Rainwater Filter Collector Universal Downpipe Filter**

---

Se acopla a la bajada de agua, intercepta el camino hacia el almacenamiento; y mediante el uso de una válvula se cambia la dirección del flujo.

Ventajas:

- De fácil instalación y bajo coste
- Incluye una trampa para hojas y sólidos grandes en el mismo separador
- Control total sobre el volumen que se desea separar
- 

Desventajas:

- Susceptible a errores humanos, puede que el agua pase directamente si no se cambia la dirección del flujo.

No es automático; y no tiene ningún grado de automatización.



**País: Australia**

**Empresa: Blue Mountain Co.**

**Nombre del producto: First Flush Delta Commercial**

---

Usado para separar grandes volúmenes de agua, su funcionamiento se basa en un tipo de desviación por intercepción, y su desfogue se hace progresivamente.

Se adapta a más superficie de captación con el uso de tuberías acopladas en serie.

Ventajas:

- Fácil instalación.
- Mantenimiento fácil y no frecuente.
- Se corrige el problema de aumentar la longitud del dispositivo por medio de la compilación en serie de tubería.

Desventajas:

- El volumen de separación está limitado a las dimensiones del dispositivo.
- Puede ser un problema el que necesite de una base adecuada para su colocación.
- El volumen de agua separada siempre será el mismo



Fuente:  
(Blue Mountain  
Co, 2018)

**País: México**

**Empresa: Isla Urbana**

**Nombre del producto: Tlaloque**

---

Según su ficha técnica, el tlaloque está predeterminado para separar 210 litros de agua; equivalentes a 120m<sup>2</sup> de superficie de captación. La desviación se hace por intercepción

Ventajas:

- Única alternativa comercial en México
- Fácil de instalar.
- Poco mantenimiento
- Se puede ajustar el volumen que se desea separar.
- Desfogue automático.

Desventajas:

- Puede llegar a ser muy grande para ambientes urbanos.
- Se obliga a tener una base adecuada para tenerlo



**País: México**

**Empresa: Isla Urbana**

**Nombre del producto: Tlaloquito**

---

Según su ficha técnica, el tlaloquito está predeterminado para separar 210 litros de agua; equivalentes a 50m<sup>2</sup> de superficie de captación. La desviación se hace por intercepción

Ventajas:

- Única alternativa comercial en México
- Fácil de instalar.
- Poco mantenimiento
- Se puede ajustar el volumen que se desea separar.
- Desfogue automático.

Desventajas:

- Su volumen no es ajustable



### 3.1.2. Innovación de los separadores de primeras aguas

Los dispositivos actuales suelen tener especificaciones técnicas sobre cuántos dispositivos usar, o la longitud que éste debería tener en función de la superficie de captación. Esto es debido a la estrecha relación que existe entre la superficie de captación (techo) y el volumen captado por el sistema de aprovechamiento pluvial.

Ha habido intentos por mejorar la forma en que se discriminan las primeras aguas de lluvia, algunas muy inventivas y que sus autores denominan “automáticas” como la que muestra Gould y Nissen-Petersen en la figura 3-1. Sin embargo, no se ha hecho un avance significativo en el funcionamiento de estos, que, aunque “automáticos” siguen utilizando el principio de desviación por intercepción de volumen, y no suponen ningún cambio significativo, más que los métodos de construcción de unos y otros.

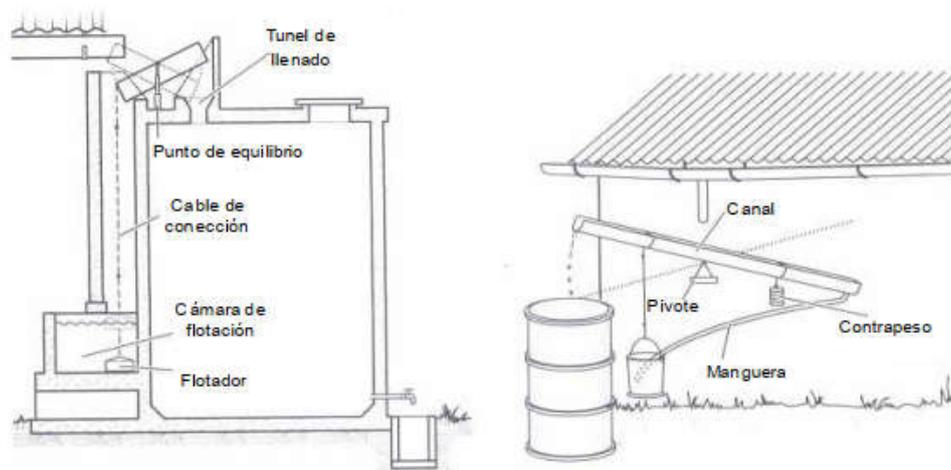


Figura 3-1 Separadores de lluvia automáticos planteados por Gould y Nissen-Petersen

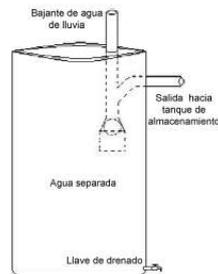
Trabajos posteriores han planteado y construido separadores de primeras aguas distintos a estos, sin embargo, siguen utilizando el mismo principio de desviación por intercepción. Un ejemplo de esto son los dispositivos construidos por (García Velázquez, 2012).

*Estado del arte de los separadores de primeras lluvias*

A)



B)



C)



Figura 3-2 A) Dispositivo construido y analizado por García Velázquez y basado en la propuesta de la UNATSABAR en 2001 B) Dispositivo construido y analizado por García Velázquez y basado en la propuesta de Isla Urbana C) Dispositivo propuesto, construido y analizado por García Velázquez

De estos tres dispositivos distintos (García Velázquez, 2012), el autor hace una tabla comparativa entre las ventajas y desventajas de los separadores de primeras lluvias que él mismo construyó y se muestran los resultados en la tabla 3-1

## *Estado del arte de los separadores de primeras lluvias*

Tabla 3-1 Comparación de los dispositivos de separación de primeras aguas de lluvia (García Velázquez, 2012).

<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
<p>Modelo a) (UNATSABA R, 2001)</p> <p>Es un modelo propuesto por un manual de captación de lluvia de la UNATSABAR en 2001 y existe documentación para su implementación.</p>	<p>El agua puede derramarse del barril sin una tapa hermética. Fue complicado sellar la tubería de PVC al tambo manteniendo el mismo diámetro. Requiere una mayor cantidad de material de PVC que los otros.</p>
<p>Modelo b) (Isla Urbana, 2010)</p> <p>Reduce el número de piezas y material, por lo que es menos costoso y más simple de implementar que el anterior. El diseño disminuye el problema de derrame de agua del barril aún sin tapa hermética.</p>	<p>Se observa que el agua de primera lluvia no queda totalmente aislada por la pelota y puede mezclarse en pequeña proporción con el agua que se va a aprovechar. Esto se debe a que el chorro de agua del bajante cae de forma agresiva sobre la pelota.</p>
<p>Modelo c) (García Velázquez, 2012)</p> <p>El cierre hermético que se logra con el flotador tipo tinaco aparta perfectamente la primera agua de lavado de la que se va a aprovechar. El diseño evita completamente el derrame de agua del barril aún sin tapa hermética. Además, se puede ajustar la altura de cerrado.</p>	<p>El flotador comercial es más costoso que los anteriores. Se reduce la tubería hasta 1", lo que disminuye la capacidad de desagüe de la azotea y además podría taparse con sólidos grandes</p>

En México, el tipo de discriminante más usado es el de desviación por intercepción. Y una de las marcas que más se usa para este fin es el dispositivo *Taloque* comercializado por la empresa *isla urbana*.

# 4 Impacto potencial de la captación de agua pluvial: caso de estudio VIS CASA

---

*“Las aguas tranquilas son profundas. Las aguas poco profundas se secan con frecuencia.”*

*Thomas County Cat*

El impacto ambiental de un determinado puede analizarse en distintas formas dependiendo del propósito que tengan los análisis. Para el caso de este trabajo se tomó la decisión de hacer un análisis de los posibles efectos desde la perspectiva del ahorro de agua en el proyecto que dio origen a este trabajo: VIS-CASA. El enfoque es analizar el impacto de la captación de agua pluvial a nivel doméstico y posteriormente hacer un análisis del impacto a nivel de la red local. Para ello se tuvo en cuenta un año normalizado gracias a los datos pluviométricos diarios en el periodo (1952-2015) en tres estaciones cercanas a ciudad universitaria: 9020 (Desviación alta al pedregal), que se completó con los datos de las estaciones 9008 (Ciudad Universitaria) y 9024 (Hacienda peña pobre).

## 4.1. Agua captada y almacenada en un año promedio

Se pueden clasificar los usos del agua almacenada (Fewkes A. , 1999) en:

- Agua potable (o de alta calidad en zonas de bajo desarrollo).
- Agua complementaria a la potable.

Se hizo el análisis estableciendo cuánta agua se utilizará diariamente haciendo las siguientes consideraciones:

- El agua de lluvia captada está destinada a satisfacer parcialmente aquella agua que no tenga contacto directo con el humano, en este caso se limitó al inodoro.
- El inodoro seleccionado tiene dos tipos de descarga "Flush rate short" y "flush rate full" por lo que el consumo de agua del WC en este caso específico se traduce en aproximadamente 30(1/día) (Hernández Santiago, 2018)
- La casa es habitada por dos personas.
- El área de captación de VIS-CASA es de 13.8m<sup>2</sup> y se considero un coeficiente de escurrimiento de  $C_e = 0.9$

## *Impacto potencial de la captación de agua pluvial: caso de estudio VIS CASA*

Habrán días en los que no haya agua pluvial almacenada que suministre la demanda, para una visualización gráfica de esta tendencia, la Figura 4-1 representa un análisis gráfico entre el agua captada por el sistema de aprovechamiento y el agua utilizada en el WC. La parte sombreada en verde representa el superávit de agua captada, y por lo tanto el agua que pasa a ser almacenada más de un día en los tanques de agua de lluvia (2 tanques de 150 litros cada uno). Por el contrario, la parte sombreada en rojo muestra cuánto déficit de agua de lluvia tendríamos algunos días. Por lo que durante este periodo es imposible que el agua captada sea autosuficiente y aunque pasa a almacenamiento se consume el mismo día.

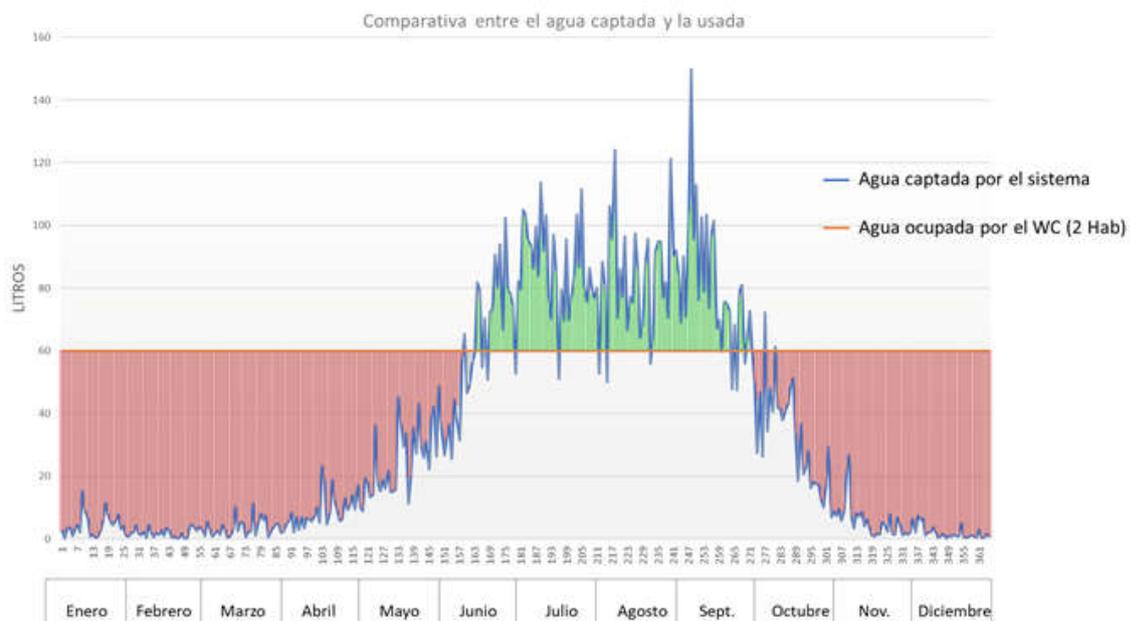


Figura 4-1 Agua captada por el sistema, comparada contra el consumo del WC.

Para que se ocupase el volumen total de agua captada (volumen total bruto) se tendría que almacenar toda el agua captada. Durante el periodo de máximas lluvias esto no es viable; la figura 4-2 muestra cuáles serían los efectos de almacenar todo el volumen de agua captada considerando en el modelo que se tiene un consumo diario de 60 (l/día) como se planteó al inicio de esta sección. Se puede concluir de la figura 4-2 que para almacenar toda el agua captada se necesita un tanque de un volumen de 2500 litros; esto para que el sistema no desperdicie ni una gota de agua. Sin embargo, para el proyecto actual, este tamaño inviable, pues la geometría de VIS-Casa y el concepto para el que fue creada nos limitan a dos tanques de agua pluvial de 150 litros; es decir 300 litros de almacenamiento para agua de lluvia.

## Impacto potencial de la captación de agua pluvial: caso de estudio VIS CASA

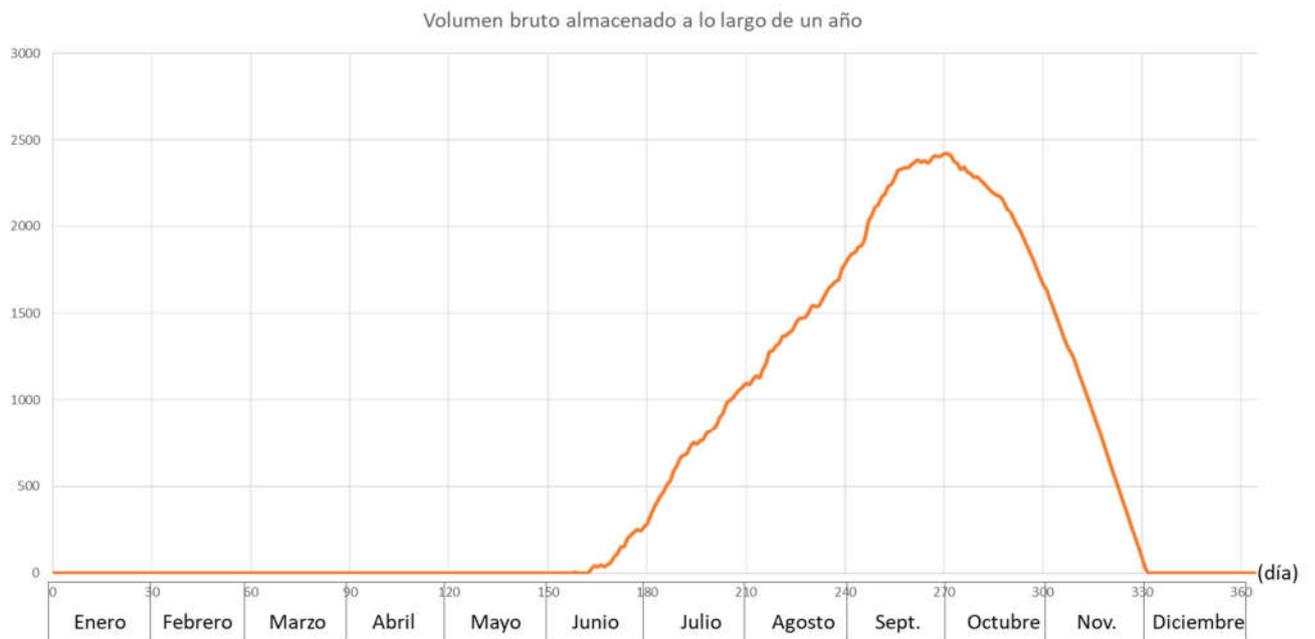


Figura 4-2 Volumen bruto que es posible almacenar a lo largo de un año

### 4.1.1. Ahorro anual de agua en VIS CASA por efectos de la captación pluvial.

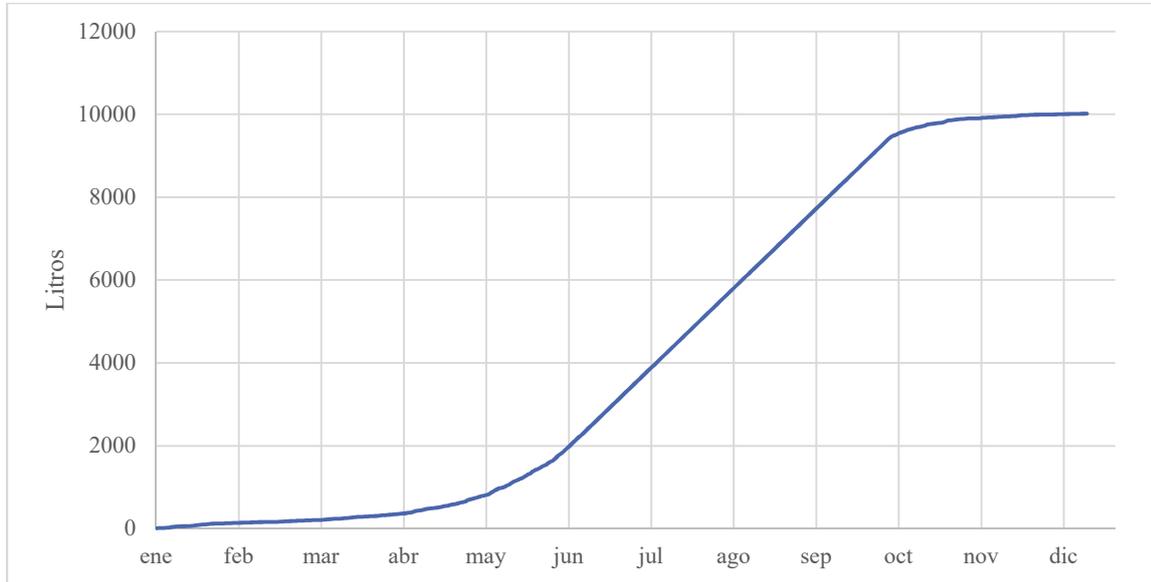
Debido a las limitantes mencionadas, se hizo un modelo con el almacenamiento de 300 litros. Es por ello por lo que se recurre a una comparativa entre ambos volúmenes de almacenamiento. La figura 4-3 muestra el comportamiento con estas condiciones de almacenamiento.



Figura 4-3 comportamiento del sistema con un volumen de almacenamiento de 300 litros

## *Impacto potencial de la captación de agua pluvial: caso de estudio VIS CASA*

Para responder cual es el beneficio en volumen ahorrado por captar agua de lluvia en VIS-CASA es preciso hacer la suma de volúmenes que se consideró en la figura 4-3, como en este caso se considera un almacenamiento de 300 l, se puede apreciar que el ahorro de agua anual ronda los 10 000 litros anuales (figura 4-4).



**Figura 4-4 Ahorro de agua en un año por el sistema de captación (VIS CASA)**

Tomando en cuenta que la demanda de agua promedio de una persona es de 150(l/día), el porcentaje de agua ahorrada en VIS CASA con dos habitantes es del 9.1%. Es decir que en VIS CASA la décima parte del agua que se consumiría es pluvial.

### 4.1.2. Ahorro anual de agua en una casa promedio por efectos de la captación pluvial.

El caso anterior es muy específico, pues se considera para el prototipo de vivienda VIS Casa, se vio que aún con las limitantes del proyecto el ahorro anual de agua llega a ser del 9.1%.

Según la OMS (2009) aproximadamente el 60% del agua que una persona consume se utiliza en el arrastre de excretas, lavado de ropa y el aseo doméstico

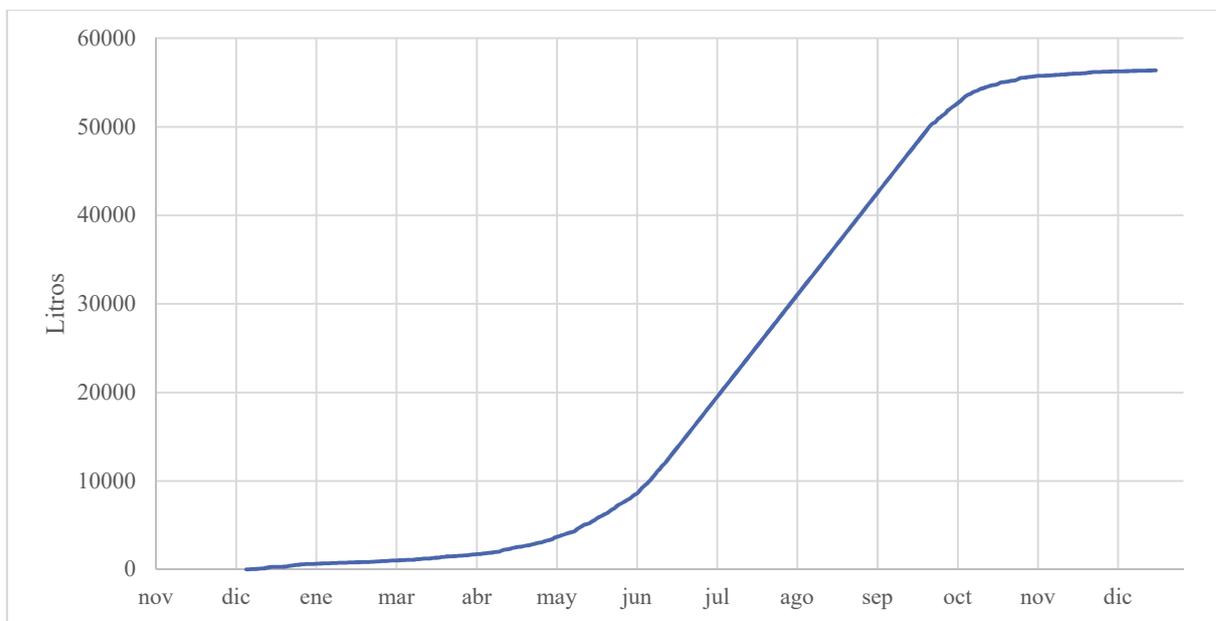
Consideremos un caso más acercado a la realidad:

- Vivienda de 72m<sup>2</sup>
- 4 personas
- Consumo de 150 l/día\*hab
- Se utiliza el agua captada para satisfacer el 60% del consumo

### *Impacto potencial de la captación de agua pluvial: caso de estudio VIS CASA*

- Se cuenta con un almacenamiento de 1000(l)

Dadas las condiciones se tiene un ahorro más optimista para una casa más acercada a las condiciones reales de vida, el resultado se muestra en la figura 4-5



**Figura 4-5** Ahorro de agua debido al sistema de captación de lluvia (Casa promedio).

Para este último caso el ahorro anual de agua pasa a ser de 56 354 litros, que representa un ahorro del 25.7% anual de agua.

# 5 Dispositivo inteligente para la separación de primeras aguas de lluvia [DISPLU]

---

*“Nada hay más importante que ver los caminos de la inventiva, que son, en mi opinión, más importantes que las invenciones mismas”.*

*Gottfried Wilhelm Leibniz*

## 5.1. Antecedentes del proyecto

Como consecuencia de las problemáticas que implica la vivienda en las grandes ciudades, y con el objetivo de ofrecer alternativas de viviendas sustentables se crea el proyecto VIS-CASA UNAM; este proyecto pretende implementar sistemas industrializados para fabricar volúmenes del producto a costos accesibles y de una calidad de excelencia.

El compromiso de VIS CASA UNAM es con el impacto ambiental que tendrá sobre el municipio en el que se instale, reduciendo en energía e insumos, así como desechos. Pretende gestionar, conjuntamente, procesos integrales para disminuir el impacto ambiental mediante la implementación de nuevas tecnologías.

El resultado de este trabajo nace de la encomienda por parte del proyecto VIS CASA UNAM para crear un sistema eficiente de captación de agua pluvial. Por su puesto, en la literatura actual hay pasos a seguir y fórmulas probadas para la implementación de dichos sistemas, sin embargo, la visión del equipo encargado del sistema hidráulico siempre fue con vista en la innovación.

La implementación de algún sistema ya existente aportaría poco a las personas que trabajamos en el proyecto, y nada al avance tecnológico en el sector.

## 5.2. Áreas de oportunidad en los dispositivos separadores de primeras lluvias actuales

En la sección 3.1 mostraron los dispositivos separadores de primeras aguas de lluvia, o de primer flujo. La mayoría de ellas comparten el mismo esquema de funcionamiento: el de separación por intercepción de un volumen fijo. Un esquema del proceso que sigue el agua captada enfatizando la importancia de los separadores de primeras aguas se muestra en la figura 2-18 que se presentó en la sección 2.6.2; el proceso de diseño se basó en este esquema para identificar las posibles áreas de oportunidad, enfocándonos en los problemas que los separadores por intercepción de volumen fijo tienen.

Basándose en este modelo, Martinson y Thomas, hicieron el siguiente análisis con el objetivo de buscar las relaciones óptimas del volumen de diseño de separación ( $ff_d$ ), el tiempo de reseteo ( $tr$ ) para el cual vale la pena mencionar algunos conceptos:

*Tiempo de reinicio ( $tr$ ):* Es el tiempo que le toma a un separador de primeras aguas de lluvias vaciarse después lluvias vaciarse después de un evento.

*Volumen separado( $ff$ ):* Es el volumen de escurrimiento pluvial que se separa, removiendo consigo una masa de contaminantes; si se antecede de un periodo seco mayor al tiempo de reinicio, este volumen corresponderá al volumen de diseño.

*Eficiencia de separación de contaminantes  $\eta_r$ :* Es una medida que representa qué tan bien se remueven los contaminantes debido al separador de primeras aguas. Se representa como el total de masa removida por el separador ( $L_l$ ) y el total de masa de contaminantes que son lavados desde la superficie de captación ( $L_r$ ).

$$\eta_r = \frac{\sum L_l}{\sum L_r} \quad \text{ec. (5.1)}$$

*Eficiencia de volumétrica  $\eta_v$ :* Es una medida que representa qué tan poca agua es usada por el dispositivo de separación de primeras aguas. Puede ser medido en dos puntos: en la entrada al tanque de almacenamiento ( $\eta_{v,i}$ ), y a la salida de este ( $\eta_{v,o}$ ). La manera más lógica de pensar en esta eficiencia es medirla en la entrada al tanque de almacenamiento, luego del separador de primeras aguas, sin embargo, la manera que refleja mejor la eficiencia que resiente el usuario es aquella en la salida del tanque.

La eficiencia volumétrica en la entrada ( $\eta_{v,i}$ ) del tanque se calcula dividiendo la suma de los volúmenes escurrimientos después del separador de primeras aguas ( $V_{r,ff}$ ) por la suma del escurrimiento sin la separación ( $V_r$ ). Como el área de captación es la misma para ambos escurrimientos, es más sencillo dejarlo en términos de mm de lluvia.

$$\eta_{v,i} = \frac{\sum V_{r,ff}}{\sum V_r} = \frac{\sum(r-ff)}{\sum r} \quad \text{ec. (5.2)}$$

La eficiencia volumétrica a la salida del tanque es calculada usando  $V_{r,ff}$  en lugar de  $V_r$ , y en el balance de masas y dividiendo la extracción de agua del sistema con el separador de primeras

*Dispositivo inteligente para la separación de primeras aguas de lluvia [DISPLU]*

aguas ( $V_{w,ff}$ ) con el total de extracciones de un balance de masas sin el separador de primeras aguas

$$\eta_{v,o} = \frac{\sum V_{w,ff}}{\sum V_w} \quad \text{ec. (5.3)}$$

Con estos conceptos en mente, Martinson y Thomas llegaron a resultados interesantes haciendo simulaciones con distintos parámetros, las cuales fueron hechas de forma adimensional dividiendo el volumen captado entre el volumen promedio diario, por lo que se decin, por sus siglas en inglés (average daily runoff). Cada parámetro se varió separadamente dentro de un sistema de captación “estándar” donde el tanque de almacenamiento era 10xADR y la demanda nominal 0.8xADR, el tiempo de acumulación fue tomado al 99% en un máximo de 25 días Esgurrimiento diario promedio

Los primeros resultados de esta investigación muestran que en general, para aumentar la calidad del agua disminuyendo la concentración de los contaminantes la eficiencia volumétrica se ve comprometida, llegando a ser, en algunos casos, poco mayor al 50% cuando se requiere una eficiencia de separación de contaminantes más allá del 90%. Así mismo se muestra consistentemente que en la separación de primeras aguas la eficiencia volumétrica mejora con tanques de almacenamiento más grandes y con demandas pequeñas. Así mismo se muestra que los tiempos de reinicio del separador pequeños suelen tener una peor eficiencia volumétrica en tanto la eficiencia de separación de contaminantes sea mayor

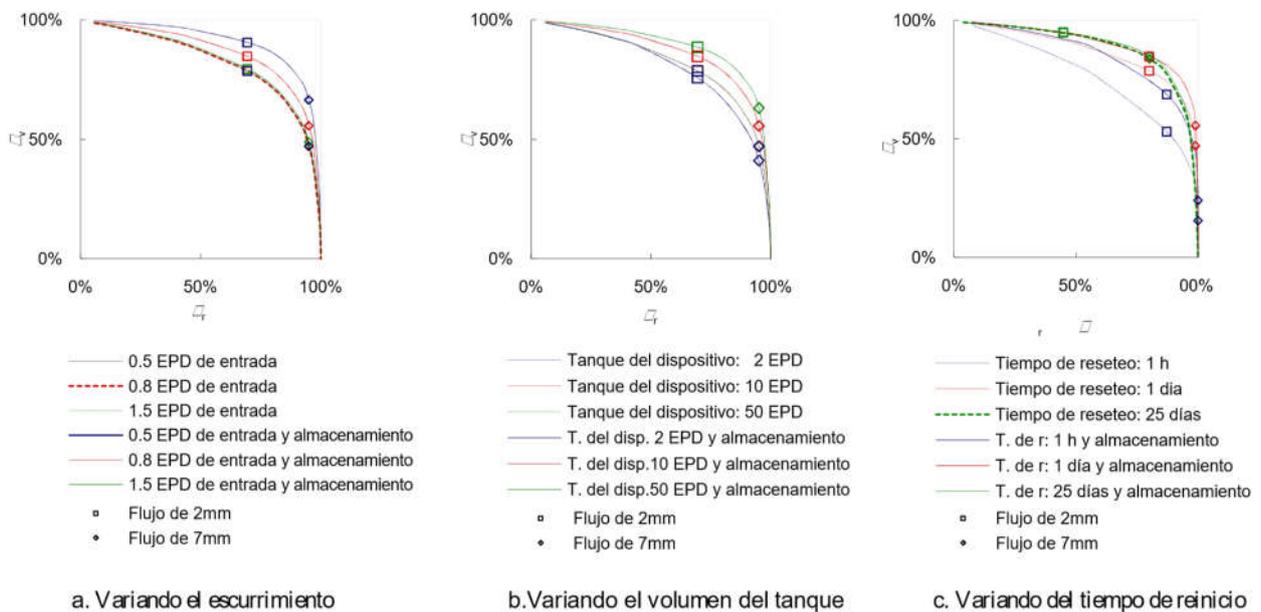


Figura 5-1 Curvas de eficiencia de remoción vs eficiencia volumétrica (Martinson & Thomas, 2009)

La figura 5-2 también muestra resultados interesantes que siguen la misma línea que la figura anterior, en primer lugar, tenemos que para aumentar la eficiencia de separación de contaminantes

*Dispositivo inteligente para la separación de primeras aguas de lluvia [DISPLU]*

tenemos dos opciones: empeorar la eficiencia volumétrica o aumentar el volumen de almacenamiento del tanque.

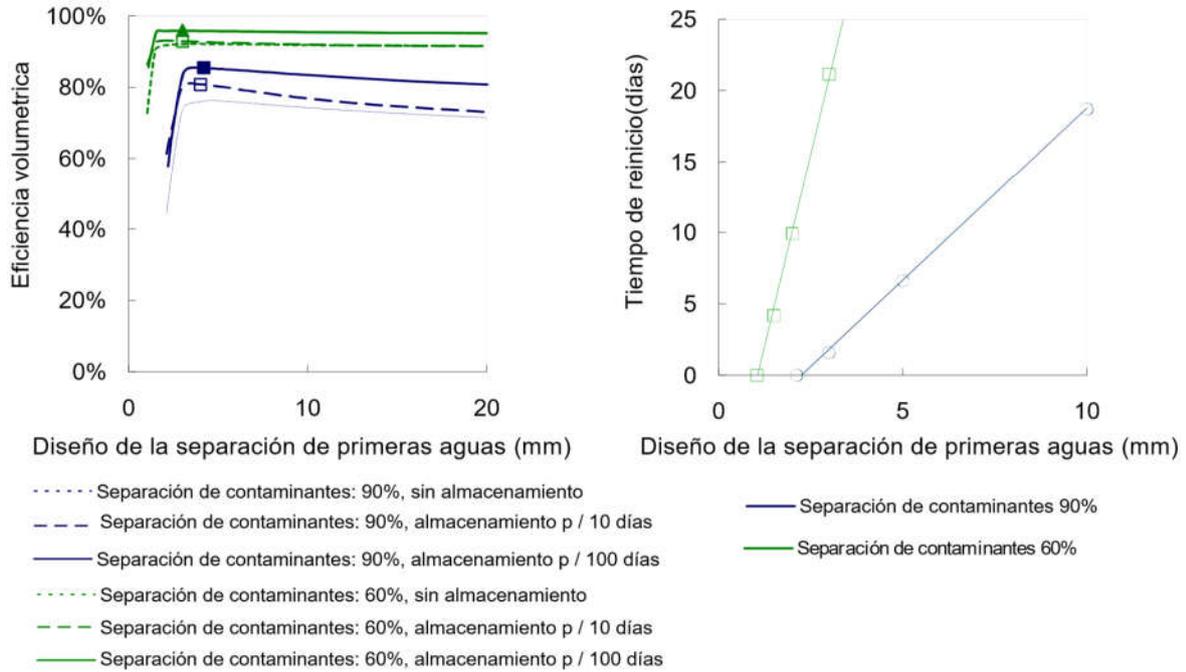


Figura 5-2 Diseño óptimo de separadores por intercepción (Martinson & Thomas, 2009)

En segundo lugar, se muestra que al aumentar el tiempo de reinicio del separador de primeras aguas también aumentamos la precipitación de diseño. Este comportamiento es más marcado cuando queremos que el porcentaje de eficiencia de separación de contaminantes sea alto.

Todos los resultados a los que muestran Martinson y Thomas encaminan a pensar que para aumentar la calidad de agua de lluvia debemos sacrificar eficiencia volumétrica, y esto implica separadores de primeras aguas de lluvia cada vez más grandes.

Se concluye entonces, que, para un dispositivo comercial básico, la calidad del agua que entregue al almacenamiento será óptima si la superficie de captación es pequeña, e irá empeorando conforme esta aumenta, llegando un punto en el que la eficiencia sea muy baja. Esto lo saben algunos fabricantes y es la razón por la que existen tablas de decisión como la 5-1.

Tabla 5-1 Tabla de decisión para comprar los productos de Isla Urbana

Área del techo	Diámetro de tubería	Separación de primeras lluvias
Hasta 50m2	2"	1 Tlaloque
Más de 50m2 y hasta 120m2	3"	1 Tlaloque
Más de 120m2 y hasta 250m2	4"	2 Tlaloque

## *Dispositivo inteligente para la separación de primeras aguas de lluvia [DISPLU]*

Sin embargo, en todos los estudios que llegaron a concluir estos resultados, se basan en asumir que todos los fenómenos de primer flujo caen cerca del área 1 de la figura 2-17. Sin embargo, se escapan del análisis eventos que tengan una naturaleza diferente, ejemplo de ello sería una tormenta de larga duración y muy baja intensidad, como suelen ser las tormentas convergentes causadas por frentes y ciclones, figura 5-3.

### 5.2.1. [DISPLU] (dispositivo inteligente para la separación de primeras lluvias)

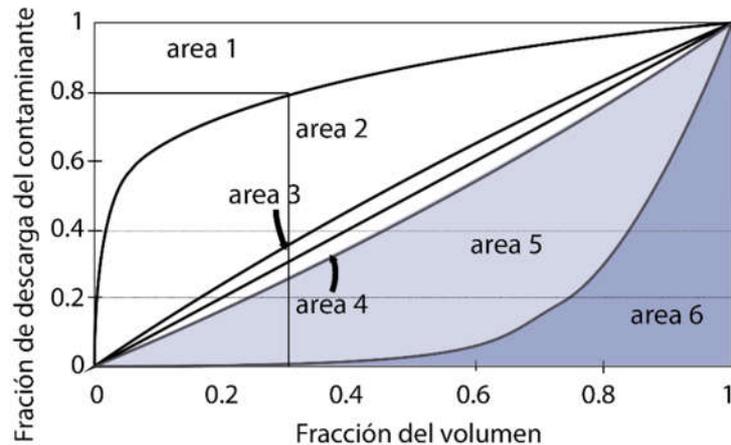


Figura 5-3 En azul, tipo de lavado de contaminantes que no consideran las teorías de primer flujo (Saget, Chebbo, & Bertrand-Krajewski, 1996)

Con los problemas de los separadores de primeras aguas comerciales, se llega a conclusiones sobre qué características debería tener una versión ideal de un separador de primeras aguas de lluvia. Las características enfocadas a tener un dispositivo separador de primeras aguas de lluvia que priorice la calidad del agua sin afectar la eficiencia volumétrica son enumeradas a continuación:

1. Alcanzar una eficiencia de separación de contaminantes cercana o incluso superior al 90%.
2. Alcanzar una eficiencia volumétrica alta.
3. Cubrir los dos puntos anteriores sin aumentar el tamaño del dispositivo.
4. Reducir al máximo el tiempo de reinicio del sistema, idealmente minutos.
5. Que un mismo modelo comercial se adapte a distintos tamaños de superficie de captación sin afectar ninguno de los puntos anteriores

Estas son características de eficiencia en funciones, sin embargo, otras características de diseño e implementación pueden sugerirse:

- Que requiera un mantenimiento mínimo
- De un diseño estético destacable
- Costo accesible

## *Dispositivo inteligente para la separación de primeras aguas de lluvia [DISPLU]*

- De funcionamiento automático

Dadas las características anteriores, y tratando de cubrir la mayor parte de ellos, en este documento se concentra el proceso de diseño y construcción de un nuevo sistema de separación de aguas de lluvia.

Con el fin de alcanzar estos objetivos nace la idea de hacer un dispositivo separador de primeras aguas de funcionamiento automatizado por medio de la implementación de electrónica básica. El objetivo de este trabajo es presentar las bases necesarias y la construcción de un prototipo que cubra las deficiencias de los dispositivos actuales. En los siguientes capítulos se describe el proceso que se siguió para llegar a un prototipo funcional.

# 6 Hidráulica para el diseño del DISPLU en la Ciudad de México

---

*“Solemos olvidar que el ciclo del agua y el ciclo de la vida son uno mismo”*

*Jacques Y. Cousteau.*

Para todos los tipos de obras que tengan relación directa o indirecta con eventos de precipitación se tienen consideraciones preestablecidas, normatividad o incluso manuales completos de cómo proceder paso a paso con los datos hidrológicos para diseñar lo que se desea, es por esto que en la sección 2.2.2 se resumen algunas medidas pluviométricas de interés para la labor del ingeniero civil. Otros estudios que deben tomarse en cuenta véase la tabla 6.1, que presenta un resumen que ejemplifica cuáles datos son importantes para diferentes propósitos o tipos de infraestructura.

La delimitación del prototipo está en función de las características de precipitación del sitio en donde esté funcionando, también dependerá de la superficie de captación y de la calidad del agua que se obtenga y que se pretenda obtener después del proceso de separación. Las características anteriores son altamente inciertas para cada evento de precipitación, no obstante, se pueden hacer consideraciones y análisis históricos de los eventos para delimitar un margen en el que el dispositivo debería funcionar. Para establecer dichas conjeturas es necesario definir una zona de estudio, y para iniciar este trabajo, se presenta un resumen de la hidrología de la Ciudad de México, específicamente de la región hidrológica en la que esta se encuentra con el fin de familiarizarse con el sitio para el que se diseñará el DISPLU: la región hidrológica XIII; El valle de México y sistema Cutzamala.

*Hidráulica para el diseño del DISPLU en la Ciudad de México*

Tabla -6-1 Estudios hidrológicos de proyectos de propósito múltiple

Propósito	E s t u d i o				
	Precipitación	Evaporación	Infiltración	Caudales, niveles	Condiciones de aguas subterráneas
<b>Erosión del suelo</b>	Intensidad y duración	Humedad del suelo	Captación de infiltración	-	-
<b>Control de crecientes</b>	Altura de precipitación de la tormenta, intensidad, duración	-	Tasa de infiltración actual	Frecuencia de caudales máximos.	Infiltración entrante
<b>Navegación</b>	-	-	-	Hidrograma de niveles. Curva de duración de niveles. Niveles mínimos	Infiltración de agua a través de canales
<b>Hidroelectricidad</b>	Precipitación y evaporación sobre el área de drenaje y evaporación desde el área del embalse.		-	Promedios	Infiltración a través de presas.
<b>Drenaje</b>	Frecuencia de tormenta, intensidad, duración	Altura del drenaje anual	Tasa de infiltración actual	-	Niveles
<b>Irrigación</b>	variación anual de la precipitación; temporada de cosecha	Máxima evaporación. Transpiración	Perdidas por infiltración	Años húmedos y secos. Niveles en bocatoma.	Pérdidas por percolación. Nivel de la tabla de agua
<b>Abastecimiento de aguas</b>	Precipitación y evaporación sobre el área de drenaje y evaporación desde el área del embalse.		-	Años húmedos y secos.	Rendimiento seguro
<b>Embalse de agua subterránea</b>	-	Evaporación anual del área de abastecimiento	Infiltración anual. Recarga	Infiltración entrante y saliente	Almacenamiento

## 6.1. Distribución de precipitación de la región hidrológica XIII: El valle de México y sistema Cutzamala

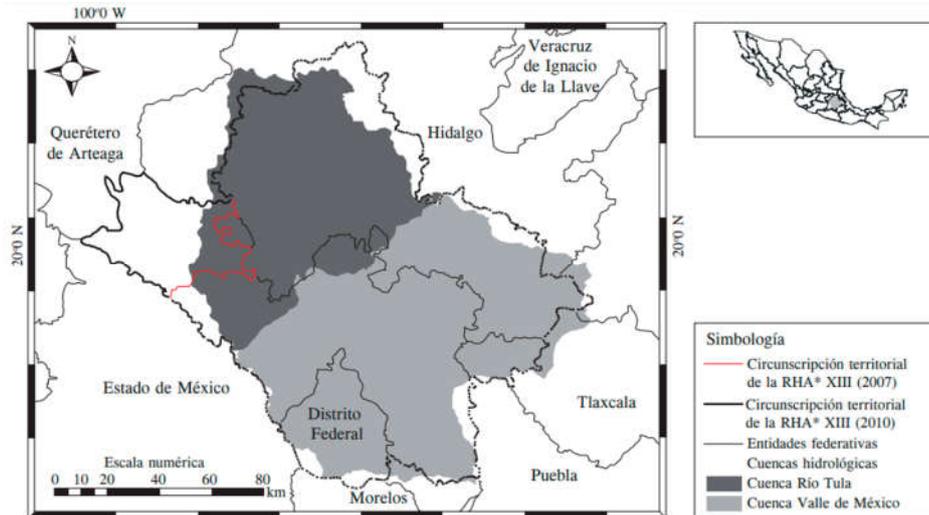


Figura 6-1 Región Hidrológico-Administrativa XIII. Adaptado de (Hernández-Suárez, 2011)

La ZMCM es una de las mayores concentraciones humanas del mundo, hacia 2015 se consideró como la novena más grande aglomeración de personas del mundo. Esta zona se ubica, en promedio a unos 2 200 metros sobre el nivel medio del mar, y hoy en día sus fuentes superficiales de agua están prácticamente agotadas. Lo cual representa un ejemplo de la vulnerabilidad del equilibrio ecológico ante el crecimiento incontrolado. Esta región ocupa menos del 1% del territorio nacional, en ella habita 20% de la población nacional y genera 31.3% del PIB nacional. La región se ubica en a la cuenca alta del río Pánuco y para fines de planeación hidráulica está formada por dos subregiones: Valle de México y Tula. Ocupa una superficie de 16 400 km<sup>2</sup> e incluye a la Ciudad de México, 59 municipios del Estado de México, 39 de Hidalgo y cuatro de Tlaxcala. Predominan los climas templado-húmedo en el sur de la región y templado-seco en el centro y norte de esta (Puyol, 2004). La precipitación media anual es de 649 mm (CONAGUA, 2010).

La figura 6-2 indica la distribución temporal de la lluvia media mensual y su análisis nos permite detectar los meses de mayor y menor precipitación, así como precisar los periodos de lluvia y estiaje. Julio resulta ser el mes más lluvioso con un valor medio de 125.8 mm, mientras que diciembre es el mes con la lluvia de menor magnitud, con un valor promedio de solamente 5.8 mm (CONAGUA, 2010).

En el mapa de la figura 6-4 se muestra la distribución de la precipitación media anual, con base en isoyetas. En él se advierte que la precipitación pluvial sufre un aumento hacia el oeste y sureste del Valle de México, de manera que mientras en el norte no hay precipitaciones menores de 400mm en la parte oeste y sureste son superiores a los 1200 mm. Si se relaciona esta distribución de la lluvia con el relieve de la región, destacaría la influencia de éste con la disposición de precipitación, lo que destacaría la influencia del efecto orográfico (Maderrey-R., 1980).

### 6.1.1. Distribución de precipitación de la Ciudad de México

La Ciudad de México es parte de la región hidroadministrativa XIII. Tiene una superficie de 1 499 kilómetros cuadrados (0.08% del total nacional). Colinda al Este, Norte y Oeste con el estado de México y al Sur con el estado de Morelos. Por su superficie territorial, el clima en de la Ciudad de México no varía mucho; se caracteriza por un clima templado subhúmedo con temperaturas medias anuales de 12° a 18° C, exceptuando la región del Ajusco y sus alrededores donde el clima es semifrío subhúmedo con temperaturas medias anuales que oscilan entre 5° y 12° C (Puyol, 2004).

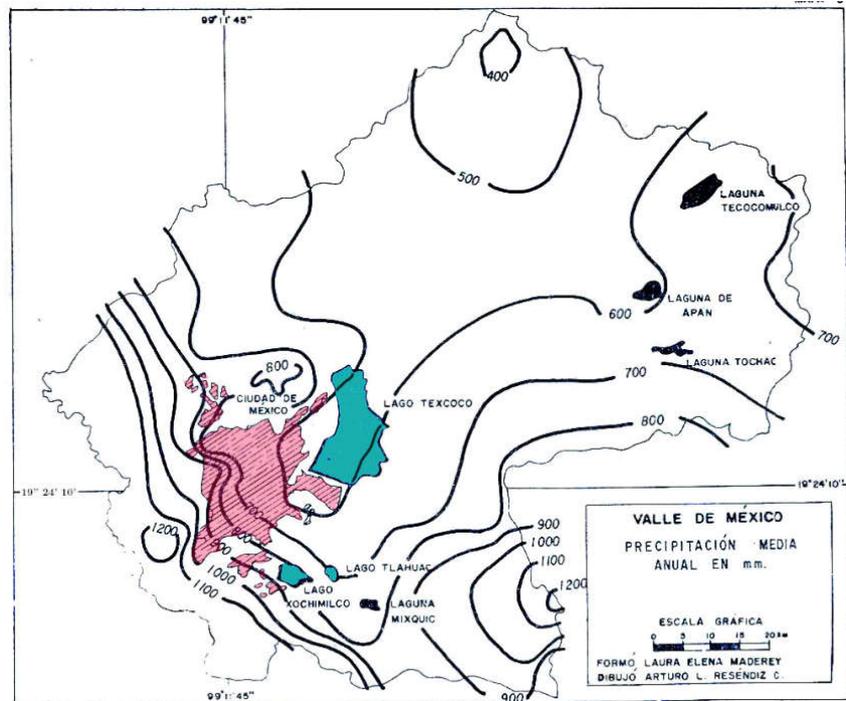


Figura 6-2 Mapa de isoyetas de la distribución de la precipitación media anual. (Maderey-R., 1980)

El régimen de lluvias que predomina en esta región es descrito con un comportamiento monzónico dentro de la clasificación climática de Köppen, pues se caracteriza por un periodo lluvioso en verano y un periodo relativamente seco durante el invierno.

Las lluvias en invierno están relacionadas con el paso de frentes fríos y contribuye únicamente con alrededor del 10% de la cantidad total de precipitación anual. Las lluvias más intensas ocurren entre los meses de mayo a octubre (Vázquez, 2000). Las cuales están asociadas a desarrollos convectivos locales y a sistemas de escala sinóptica (ondas del este).

En la región, las lluvias se ven muy influenciadas por la dinámica que induce el efecto orográfico, el cual, al interactuar con los cientos de superficie generan movimientos ascendentes que refuerzan el desarrollo vertical en las nubes. Es por esto por lo que en el poniente de la ciudad la precipitación acumulada anual puede llegar a ser de hasta 1400 mm.

La figura 6-3 ilustra la distribución de la lluvia media mensual en la Ciudad de México, a partir de este análisis se pueden detectar los meses de mayor y menor precipitación y tener conciencia de los periodos de lluvia y de estiaje. La precipitación media anual en el área de la entidad es de 719 mm (2010-2017) (S.M.N., 2018).

*Hidráulica para el diseño del DISPLU en la Ciudad de México*

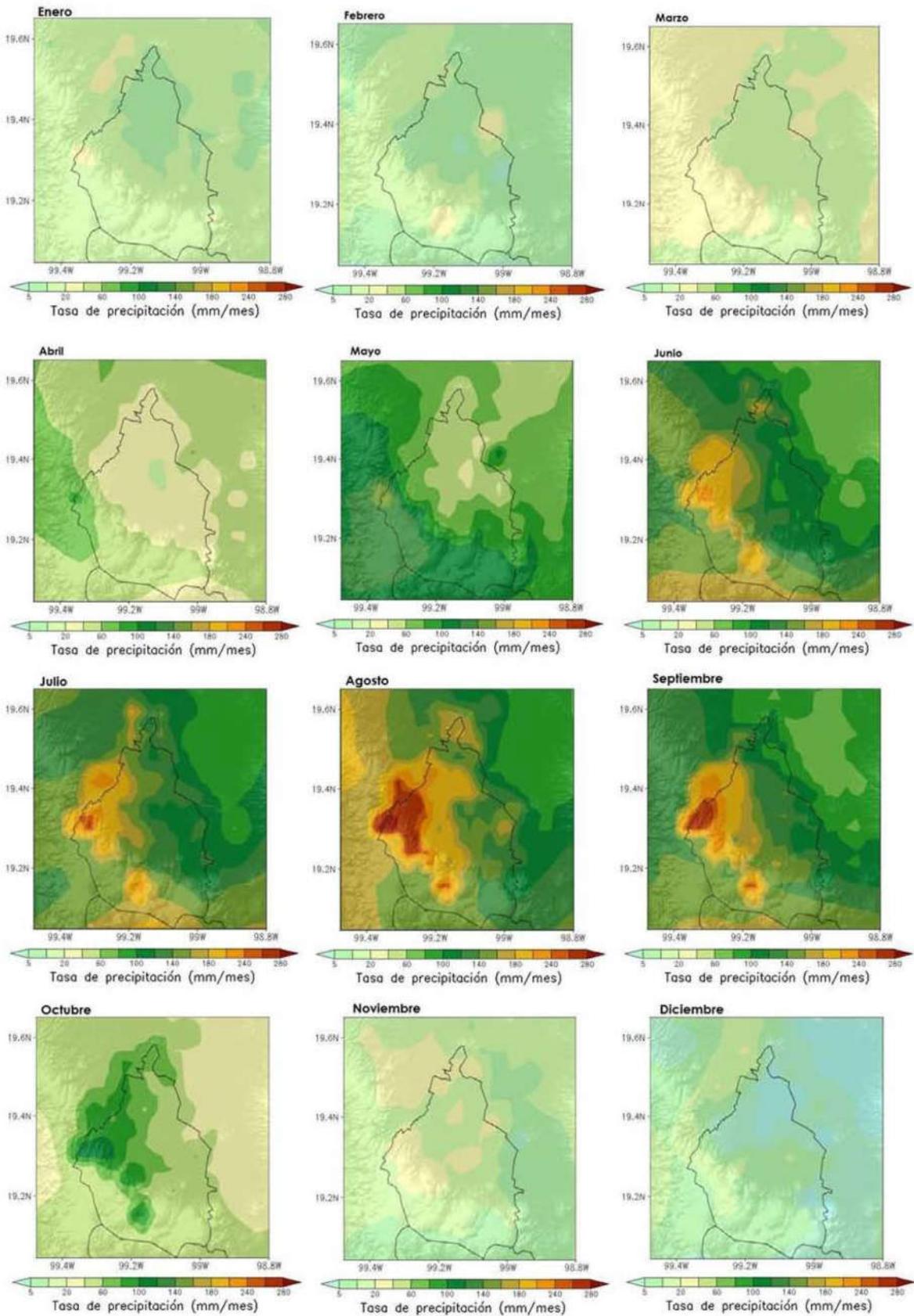


Figura 6-3 Precipitación media mensual de la región hidrológica XIII (Aquino Martínez, 2012)

Así mismo, la precipitación máxima que ocurre en 24 horas, tomada del promedio máximo diario, muestra que los eventos más intensos ocurren en el poniente de la ciudad (figura 6-4), que resulta ser una zona inestable en donde se reportan con frecuencia desastres asociados a la inestabilidad de laderas. Aunque los eventos más intensos se encuentren en esa zona, esto no quiere decir que en otras partes de la ciudad no lleguen a ocurrir tormentas intensas. Desde que tenemos registros, en la Ciudad de México han llegado a presentarse eventos de casi 100mm/día en el sureste. Causando graves daños al funcionamiento del sistema de alcantarillado.

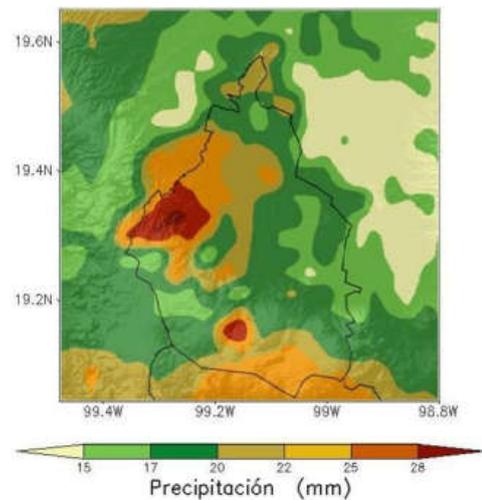


Figura 6-4 Percentil 95% de la precipitación diaria en 24 horas (1979-2003) (Aquino Martínez, 2012)

Se hizo un pequeño análisis con una estación hidrológica dentro de la zona de estudio. Cuyo fin fue familiarizarse con las características de la lluvia de la zona:

la figura 6-5 representa un histograma de frecuencia anual del promedio de eventos de precipitación diaria, es decir de todos los eventos registrados por la estación en un periodo de tiempo de 63 años (1952-2015) y se normalizó para un año la cantidad de eventos en intervalos de frecuencia de 3 mm de lluvia. La estación seleccionada fue la 9020 (Desviación alta al pedregal), que se completó con los datos de las estaciones 9008 (Ciudad Universitaria) y 9024 (Hacienda Peña Pobre).

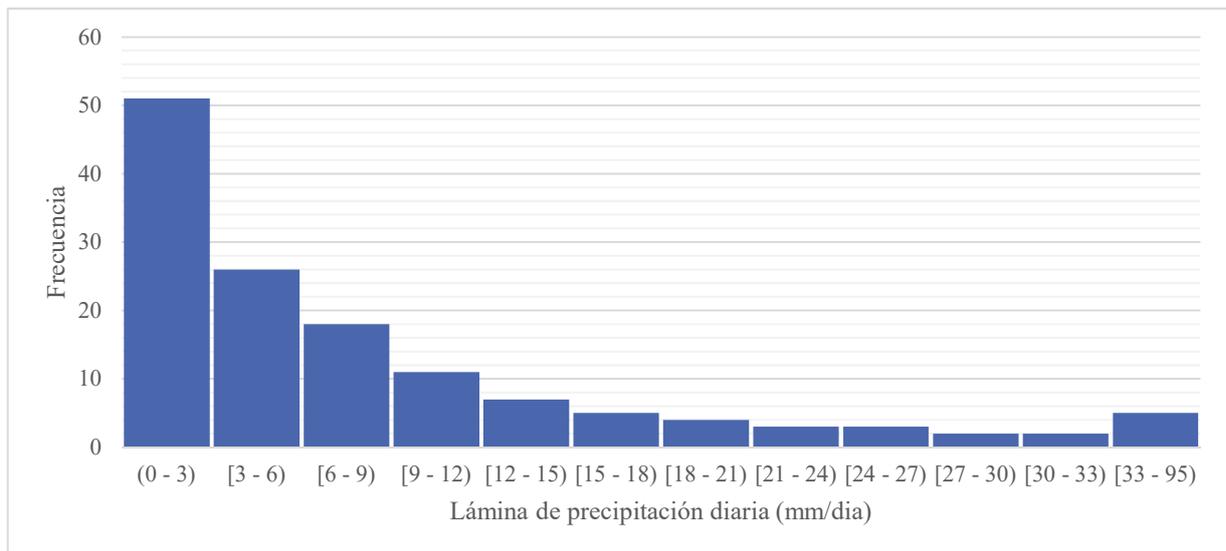


Figura 6-5 Histograma de frecuencia de los eventos de precipitación anuales normalizados para la estación 9020, con datos completados de las estaciones 9008 y 9024.

Del histograma de la figura 6-4 puede inferirse que al menos el 95% de los días en los que hay eventos de precipitación, esta no sobrepasa una lámina de 30 mm, de hecho, el 58% de las veces, esta lámina no sobrepasa los 9 mm diarios.

### 6.1.2. Tendencia de la lluvia en la Ciudad de México

Algunos estudios consiguen visualizar una tendencia en el incremento de las intensidades de precipitación en la Ciudad de México, aumentando durante el siglo XX en la ZMVM.

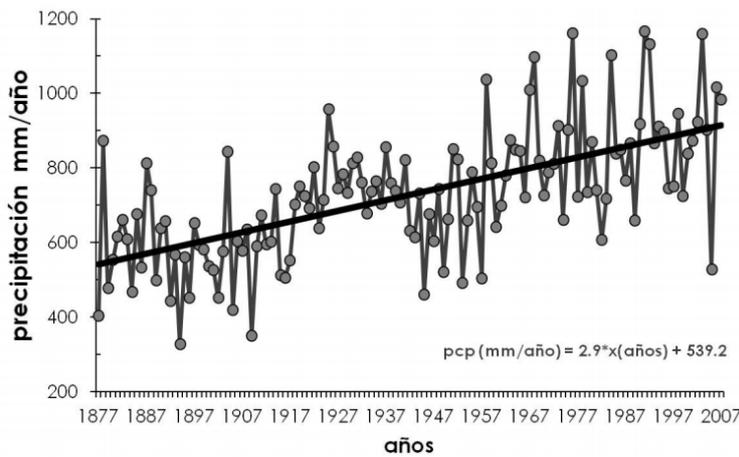


Figura 6-6 Precipitación diaria acumulada (1877-2007) (Aquino Martínez, 2012)

Se ha observado por ejemplo que, en la precipitación acumulada del observatorio de Tacubaya, la precipitación anual acumulada ha aumentado casi un 60% con respecto al año 1877.

La frecuencia de eventos mayores a 20 mm/h también ha aumentado en una proporción similar probablemente asociado con el proceso de urbanización que se ha observado en la ciudad (Jáuregui , 2000).

Los cambios de la superficie vegetal por concreto resultan en un mayor calentamiento superficial y condiciones de menor estabilidad que favorecen la formación de tormentas intensas (Magaña, Perez-Fernandez, & Méndez Pérez, 2003)

### 6.1.3. Intensidad y hora del día para las lluvias

En general, las lluvias ocasionadas por las tormentas alcanzan su mayor intensidad en el valle de México en las horas de la tarde y noche, lo que refleja un ciclo diurno. Las intensidades que se llegan a alcanzar llegan a los 100mm/h en algunas ocasiones (aunque la ocurrencia de este tipo de eventos es muy baja). A su vez, las tormentas con intensidades de precipitación de los 20 a los 30 mm/h tienen una alta frecuencia sobre todo entre las 18:00 y las 20:00.

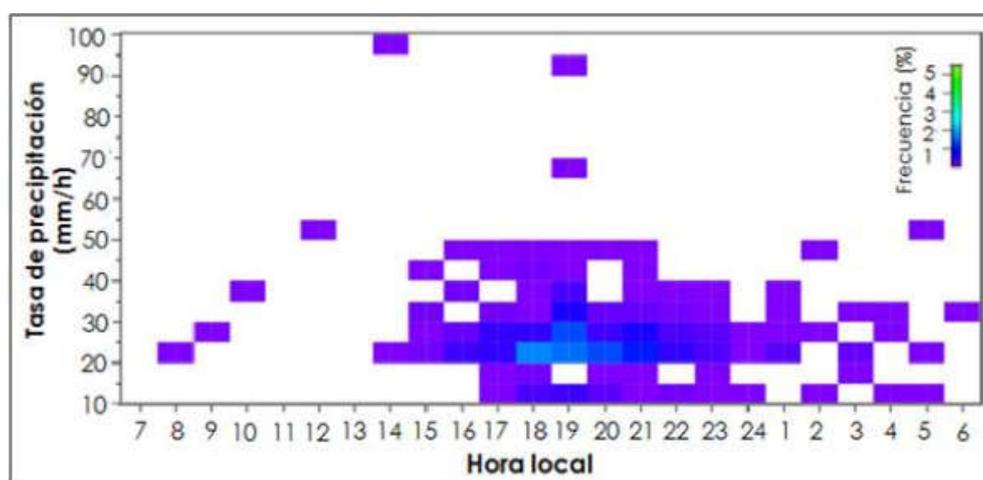


Figura 6-7 Frecuencia en el ciclo de intensidades de los eventos de tormenta entre 2003 y 2006 (Aquino Martínez, 2012)

## 6.2. Elección de una tormenta de diseño con base en la intensidad de precipitación

Al no encontrarse alguna metodología de diseño en la bibliografía consultada para este proyecto se ideó, con base en el funcionamiento deseado, una metodología para determinar el tamaño del dispositivo. Dado que el dispositivo cuenta con entradas y salidas de agua, es necesario hacer un análisis de las condiciones de entrada a las que estará sometido, y esto implica tener en cuenta las características de la lluvia (intensidades, alturas) y las de la superficie de captación (tamaño del techo) con el fin de delimitar un tamaño apropiado para el DISPLU que no sea tan pequeño como para que desborde ante intensidades frecuentes, ni tan grande como para hacerlo muy costoso, de difícil manejo o sobrado en volumen para una vivienda promedio.

La información de las secciones anteriores (5.1.1 a 5.1.3) nos es útil para elegir una tormenta de diseño, que se traducirá en una intensidad de diseño con el fin de no subdimensionar el dispositivo ya que se sabe que las tormentas convergentes no se presentan con regularidad en esta zona y que la mayoría de los eventos son de corta duración y una intensidad que puede llegar a ser significativa, del orden de hasta 100mm/h durante algunos minutos. Lo que implica que no tiene sentido tomar una precipitación de larga duración y poca intensidad como base del diseño.

## Hidráulica para el diseño del DISPLU en la Ciudad de México

Las investigaciones de Aquino-Mendez concluyen en un rango usual de intensidades de precipitación del orden de 20-30 mm/h, que, si bien tienen intensidades más altas, también es cierto que son de baja probabilidad de ocurrencia. Esta primera aproximación da una idea de las intensidades que se presentan en la zona. Para comparar estos datos también se consultó un mapa de isoyetas de precipitación máxima promedio en una hora, proporcionado por Maderey (Figura 5-6).

El mapa de precipitación máxima promedio puede interpretarse como las isoyetas que describen la máxima intensidad anual que suele presentarse en un periodo de 60 minutos.

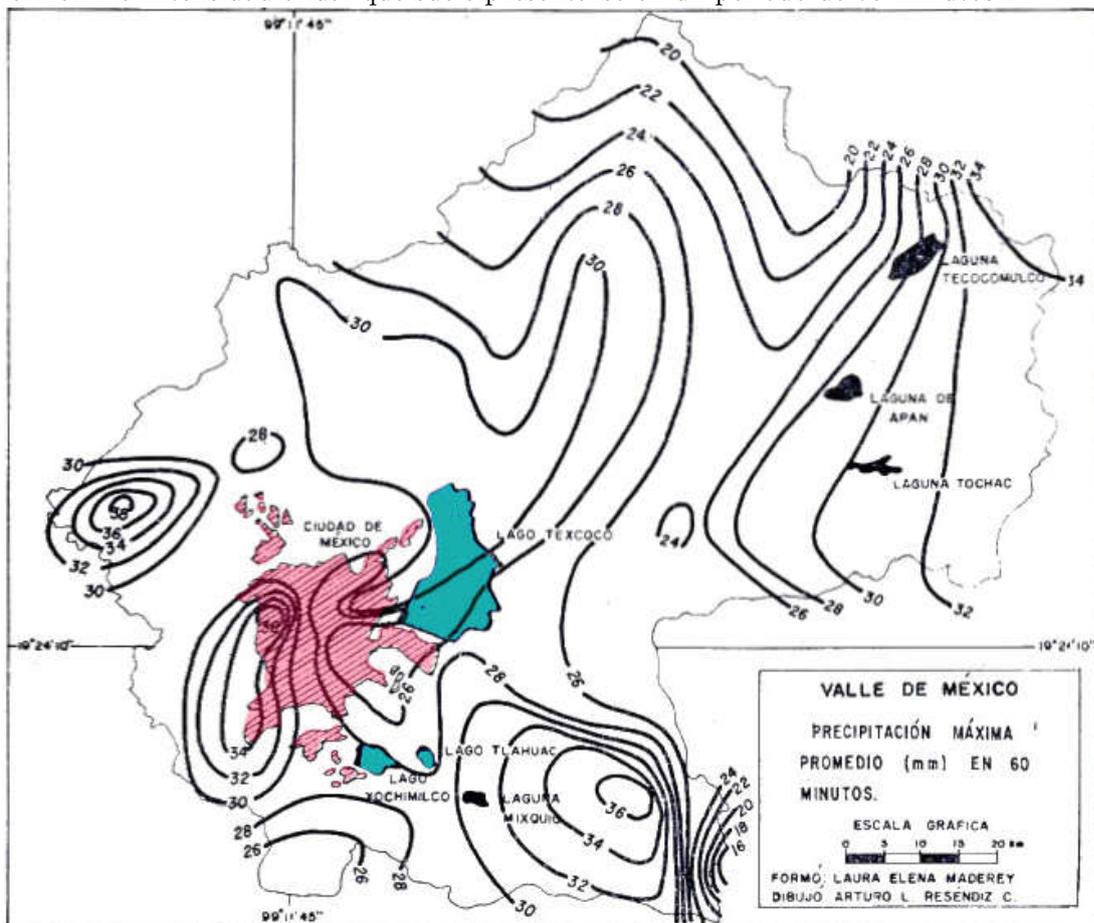


Figura 6-8 Precipitación Máxima Promedio anual en 60 min (Maderey-R., 1980)

Hasta ahora tenemos que de la figura 6-6 toda la región mantiene una intensidad máxima promedio de entre 26 y 52 mm/h, por lo que el valor que elijamos deberá ser cercano a este rango, así mismo, de las investigaciones de Aquino-Martínez tenemos una acotación de 20 a 30 mm como el rango de intensidades más probables. Por esta razón se eligió 30 mm/h como una intensidad base para el diseño del dispositivo, pues se considera una intensidad de lluvia lo suficientemente frecuente como para basarnos en ella e iniciar el diseño del prototipo

### 6.3. Análisis hidráulico para el diseño del DISPLU

Con el fin de asegurar que el dispositivo funcionará correctamente ante el flujo de agua que recibirá, evaluará y separará el dispositivo es necesario hacer un análisis hidráulico básico de las condiciones de entrada y de salida. En este capítulo se establecerán las dimensiones del DISPLU basados en un análisis de entradas y otro de salidas.

#### 6.3.1. Gasto de entrada al dispositivo

La geometría del prototipo final del proyecto de VIS CASA resulta en una superficie de captación bastante pequeña (14.3 m<sup>2</sup>), lo que representa una condición poco común para una casa habitación de dimensiones normales para la Ciudad de México. Las implicaciones de contar con una superficie de captación tan pequeña es que incidirá en la cantidad de flujo que reciba el dispositivo. Debido a esto lo más conveniente es diseñar el DISPLU con el fin de que se pueda adaptar a una cantidad más amplia de tejados. En la sección anterior se estableció que la propiedad más significativa de las tormentas que influye en nuestro problema es la intensidad de lluvia y se fijó una intensidad de 30mm/h para comenzar a iterar el diseño. Como siguiente paso se procederá analizar cómo es el comportamiento del gasto que escurre de un tejado durante tormentas de 1 mm/h hasta 30mm/h.

Para este problema, tenemos que el modelo de escurrimiento es prácticamente idéntico al modelo teórico de la superficie de captación de la sección 2.1.2 y mostrado en la figura 2-2. Así mismo la ecuación 2.1 que modela el balance hídrico en una superficie similar.  $I - O = \Delta S / \Delta t$ .

En este caso, al ser superficies de captación muy pequeñas en relación con una cuenca se tienen condiciones homogéneas y predecibles, además de que el almacenamiento es nulo en este caso particular, o lo que es lo mismo, un tiempo de retención despreciable.

$$I = O$$

$$\textit{intensidad} * \textit{área de captación} * Ce = Q_s \qquad \text{ec. (5.1)}$$

Donde Q<sub>s</sub> es el gasto de salida en cualquier instante, mientras las condiciones no cambien. Ce es el coeficiente de captación asociado al material de construcción de la superficie de captación (Tabla 2.4). Como es de esperarse, la relación es lineal y se muestra gráficamente en la figura 6-9.

Esta gráfica nos revela el comportamiento del gasto de escurrimiento proveniente del techo suponiendo una intensidad constante, sin tomar en cuenta el tiempo de retención, y con un coeficiente de escurrimiento de Ce=0.9.

La gráfica será útil para analizar el rango de funcionamiento del DISPLU una vez que se tenga terminado el modelo final y se ajuste por completo el sistema de entradas y salidas.

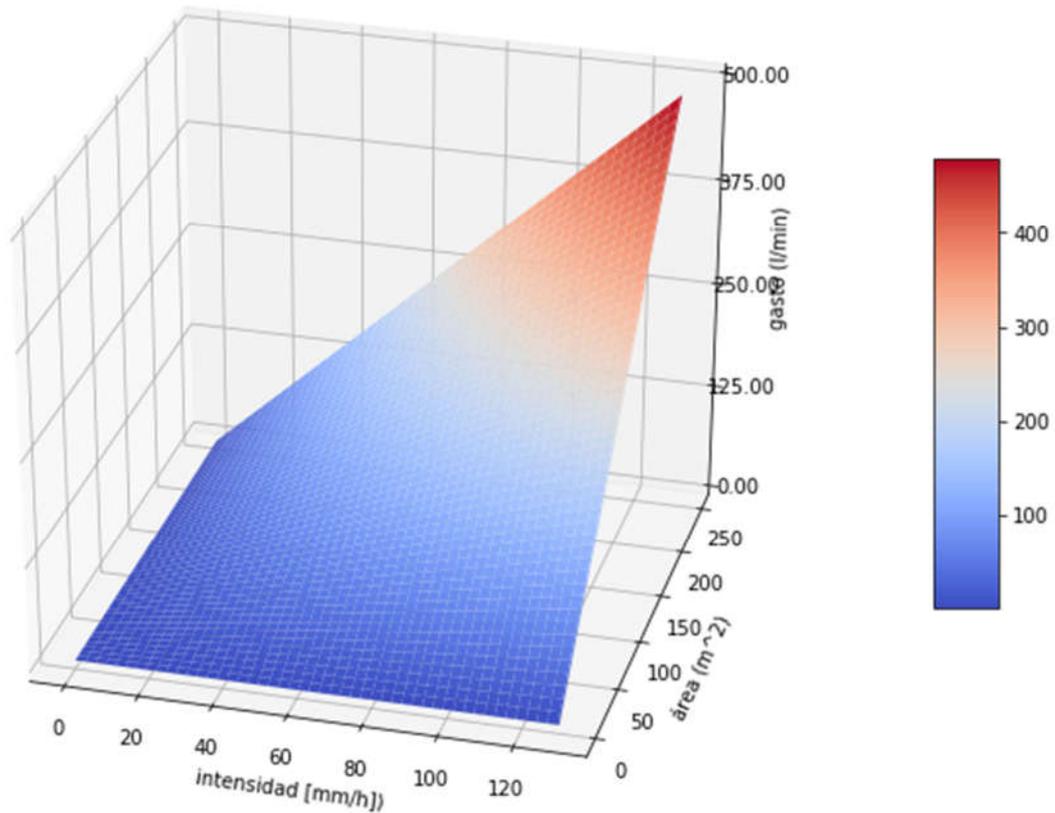


Figura 6-9 Gráfica intensidad contra gasto asociado. Se describe el comportamiento del gasto en distintas posibilidades de área de captación.

### 6.3.2. Gasto de salida del dispositivo

En situaciones ideales, el gasto de entrada debería ser el mismo de salida, pero debido al proceso que se planea ejecutar dentro del dispositivo: un análisis en tiempo real de algunas condiciones de calidad del agua y toma de decisiones sobre cuándo es conveniente almacenar el agua de lluvia, aunado a la relación exponencial entre el tamaño de las electroválvulas y su costo, es de esperarse que el agua almacenada tenga un tiempo de retención dentro del DISPLU. De estos planteamientos se desprende que es necesario analizar distintas condiciones de salida y una vez que tengamos este análisis, al compararlo con las condiciones de entrada podremos elegir algunas características del dispositivo como son su tamaño vertical, el volumen que se traducirá en un tiempo de retención y un rango de funcionamiento para cuando las condiciones de diseño principales sean superadas y la elección de los diámetros de salida del DISPLU.

En el mercado se tienen electroválvulas de todo tamaño, hasta hace poco, el uso de actuadores para automatizar válvulas era exclusivo para usos industriales por el alto costo que representa, sin embargo, las últimas tendencias comerciales permiten el acceso a este tipo de tecnología a

costos más accesibles. La Figura 6-9 muestra un modelo del funcionamiento de 4 diámetros de salidas, suponiendo que la salida se comporta como un tubo corto, es decir: como un orificio de pared gruesa.

Para este tipo de fenómeno se tiene que:

$$Q = C_d A \sqrt{2 g H} \quad \text{ec. (5.2)}$$

Donde:

- Q es el gasto de salida
- C<sub>d</sub> es el coeficiente de descarga, que para orificios de pared gruesa tiende a ser 0.82 cuando la relación e/D es menor a 3 (Sotelo, 1997, pág. 221).
- A es el área del orificio
- g es el valor de la gravedad
- H es el tirante de agua sobre el centro del orificio.

Un detalle en cuanto al área de salida que tendrá el sistema es que dependerá del diámetro comercial de tuberías, especialmente el diámetro interno de las válvulas de bola, que son las que se planea utilizar, el diámetro nominal (comercial) varía del diámetro interno de acuerdo con la figura 6-11 y la tabla 6-2

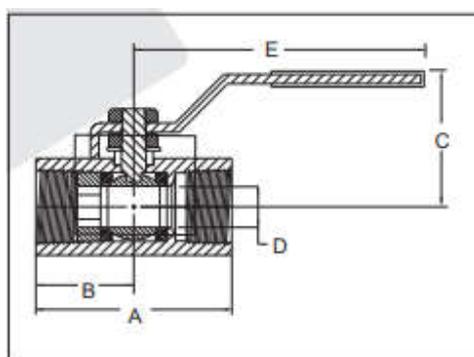


Figura 6-10 Esquema válvula de bola (Válvulas Industriales S.A., 2018)

Tabla 6-2 Medidas internas y externas de las válvulas de bola recuperado de : (Válvulas Industriales S.A., 2018)

Diámetro nominal:		1/4"	3/8"	1/2"	3/4"	1"	1 1/4"	1 1/2"	2"
Dimensiones (mm)	A	66.7	66.7	68.3	74.6	85.7	100.0	104.8	119.9
	B	34.1	34.1	35.7	38.1	43.7	50.0	54.0	61.9
	C	41.3	41.3	41.3	43.7	50.8	52.4	65.1	69.9
	D	9.5	9.5	9.5	12.7	15.9	20.6	25.4	31.8
	E	101.6	101.6	101.6	101.6	119.1	119.1	171.5	171.5
Peso (kg)		6.9	6.9	6.9	9.1	15.0	23.1	32.3	49.5

La gráfica mostrada en la figura 6-12 tiene la variable independiente (H) en el eje de las ordenadas para que sea más fácil visualizar la altura del tirante de agua sobre la tubería; gráficamente es más fácil ver la gran diferencia que hay entre los gastos generados para una salida de ½” y de 1 ½”, por lo que no es trivial definir un diámetro adecuado y se tienen que tomar en cuenta más factores.

Por otro lado, debido a que existe un tiempo de retención en el dispositivo, seguramente se tendrá que diseñar para que almacene cierta cantidad de agua, y por lo tanto se tendrá un tirante sobre el tubo de salida, por una limitante de espacio, y con el objetivo de diseñar el DISPLU lo más compacto posible, para el primer prototipo se optará por mantener las dimensiones entre 45 y 80 centímetros, rango que está representado en azul.

La figura 6-12 Representa gráficamente la relación entre el gasto de salida de diferentes diámetros de salida de las electroválvulas y la altura de la lámina de agua sobre la misma que posiblemente se pueden tener. Si tomamos como ejemplo una salida de 3/4” y limitamos el dispositivo para medir 60 cm sabremos cuál es el gasto máximo de entrada que puede soportar, suponiendo claro que este gasto sea constante (que implica una intensidad de lluvia constante también). Para este prototipo se trató de ajustarse a un tamaño de 60 cm de altura y un volumen aproximado de 80 litros, con el objetivo de aguantar un gasto de entrada de 60 (l/min) o un poco superior por al menos un minuto; esto como una especie de rango de seguridad ante los tiempos de operación de los sensores y las válvulas.

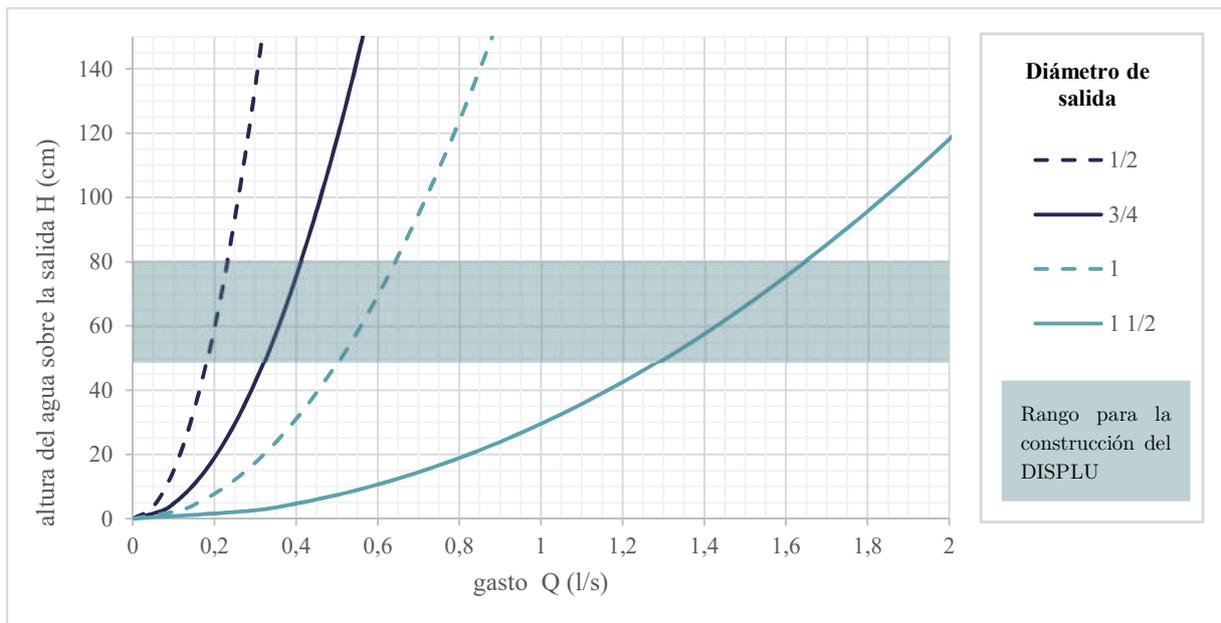


Figura 6-11 Relación H/Q de para distintos diámetros de salida.

# 7 Parámetros de calidad del agua para el monitoreo mediante sensores

---

*“El agua pura es la primera y principal medicina del mundo”*

*Proverbio eslovaco*

La calidad del agua pluvial de un sistema de recolección puede medirse en distintos puntos del sistema, se reconocen algunos puntos especialmente importantes. Tengamos en mente un sistema que cuente con un separador de primeras aguas después de su captación y antes de su ingreso al almacenamiento; en este tipo de sistema la hipótesis es que la calidad del agua separada sea diferente a la almacenada. Entonces, se tiene una calidad del agua a la salida del separador de primeras lluvias (o a la entrada del tanque) otra distinta en el agua separada, una tercera en el tanque de almacenamiento y también podría considerarse una cuarta en el punto de consumo, es decir, cuando es dispuesta para su uso final.

Entre la comunidad que estudia estos procesos se han hecho decenas de investigaciones al respecto, lo que nos da una base sólida para afirmar que la calidad del agua almacenada mejora si se implementa un sistema de separación de primeras aguas de lluvia. Como se vio en la sección 2.6: el reto actual es optimizar el proceso de separación, intentando elevar la eficiencia de separación de contaminantes sin afectar la eficiencia volumétrica. Por lo tanto, el fin último de este trabajo es crear un prototipo que incluya estas óptimas condiciones, independientemente de dónde sea instalado.

## 7.1. Efectos de la contaminación atmosférica y la superficie de captación sobre la calidad del agua captada antes de ingresar al sistema

Las características del agua entrante al sistema de almacenamiento dependen en gran medida de factores altamente volátiles y difíciles de pronosticar. Como un ejemplo concreto, en 2013 García Villegas caracterizó el agua recolectada en 13 eventos distintos. El estudio se hizo dentro de Ciudad Universitaria, en la torre de escaleras del edificio "Bernardo Quintana Arrijoja"; el agua recolectada lavó una superficie de aproximadamente 20m<sup>2</sup> y no pasó por un proceso de separación ni de tratamiento antes de ser caracterizada. También es importante mencionar que las mediciones se hicieron para el total de la precipitación y ésta no se midió, es decir, que se tomaron por igual las muestras almacenadas independientemente de la lámina de precipitación del evento. Los resultados de este estudio se presentan en la tabla 7-1, en donde puede notarse que el rango de los resultados es muy amplio y parece no tener una tendencia clara.

## *Parámetros de calidad del agua para el monitoreo mediante sensores*

Tabla 7-1 Datos de calidad del agua a 13 muestras de distintas tormentas que escurrieron sobre la misma superficie de captación (García Villegas, 2013).

Muestra	[mg/l]			pH	Conduct. [µs/cm]	UTN	UC	[mg/l]									
	ST	SS	SD					F <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>=</sup>	Na <sup>+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
1	93	2.5	90.5	7.02	96.8	85	28	0.164	1.90	14.64	9.29	1.17	0.66	0.76	0.30	14.75	163.2
2	90	34	56.0	7.03	54.4	50	16	0.093	1.04	7.39	5.11	0.37	0.54	0.37	0.14	8.85	188.8
3	62.5	1.5	61.0	7.04	44	60	18	0.061	0.39	5.39	3.64	0.49	0.37	0.35	0.08	7.54	189.5
4	50	16	34.0	7.09	66.22	25	7	0.065	0.78	7.46	6.01	0.80	0.43	0.55	0.17	9.80	117.2
5	47	6.5	40.5	7.06	52.2	30	9	0.074	0.70	8.91	5.38	0.56	2.03	0.69	0.13	6.30	179.1
6	80	14	66.0	7.05	64.6	60	17	0.057	0.76	12.01	6.51	0.55	1.14	0.59	0.18	9.80	185.6
7	56	25.5	30.5	7.04	52.8	25	8	0.107	0.93	6.86	9.82	0.92	0.30	0.44	0.45	16.60	247.0
8	65	36.5	28.5	7.29	56.2	20	6	0.091	1.12	7.55	5.07	0.81	0.55	0.60	0.24	8.00	146.5
9	46	27	19.0	6.81	78.3	15	5	0.103	1.01	5.34	5.89	0.52	0.85	0.54	0.33	12.50	305.9
10	16.5	2	14.5	7.07	39.3	10	3	0.138	0.88	3.83	10.24	3.22	0.17	0.10	0.10	6.35	133.4
11	78	3.5	74.5	6.73	44.3	70	18	0.150	0.60	2.80	3.01	0.29	0.08	0.19	0.03	3.39	41.11
12	82	10.5	71.5	6.96	62.07	60	16	0.130	0.84	9.74	5.17	0.93	0.05	0.55	0.25	10.50	182.8
13	65	15	50.0	7.06	44.6	45	10	0.132	0.53	3.22	3.77	0.69	0.06	0.52	0.13	7.25	196.6

Otro estudio que vale la pena mencionar fue realizado por C.B. Méndez y sus colaboradores en 2011. La metodología de este último fue mucho más controlada; así que los datos recolectados pueden ser más significativos a la hora de establecer conclusiones. La investigación se efectuó en Austin, Texas; y el equipo construyó modelos a escala de techos comunes en esa región.

Otros estudios, tales como (Mendez, y otros, 2011) han contrastado la calidad del agua dentro de los tanques de almacenamiento y la fracción que fue separada. Este estudio en particular reafirma que la calidad se ve mejorada por la separación de primeras aguas de lluvia y nos da una idea general de cuál es la calidad del agua en un sistema de captación.

Para dar un contexto de los resultados expuestos por Méndez en 2011 es necesario mencionar el objetivo del experimento. La hipótesis planteada fue que la calidad del agua de lluvia cambia respecto al material con el que está construido el techo, para ello se fabricaron modelos piloto de 2.8m<sup>2</sup> a una pendiente de 18. 4º simulando un techo. Para este experimento se utilizaron techos de tejas de fibra de vidrio con recubrimiento asfáltico, aluminio, placas de concreto hidráulico, un techo verde (con vegetación) y un “techo frío” de superficie acrílica.

Asimismo, para comprobar que sus resultados fueran significativos se tomaron muestras de tejados cercanos y construidos con materiales idénticos y se tomaron muestras ambientales puras, sin exposición a los techos mencionados. La figura 7-1 y 7-2 muestra 4 de los parámetros medidos en el experimento de Mendez, gráficamente se puede observar el cambio en la calidad del agua, y son aún más descriptivos los resultados cuando se les compara con la calidad de agua que tienen las muestras ambientales.

*Parámetros de calidad del agua para el monitoreo mediante sensores*

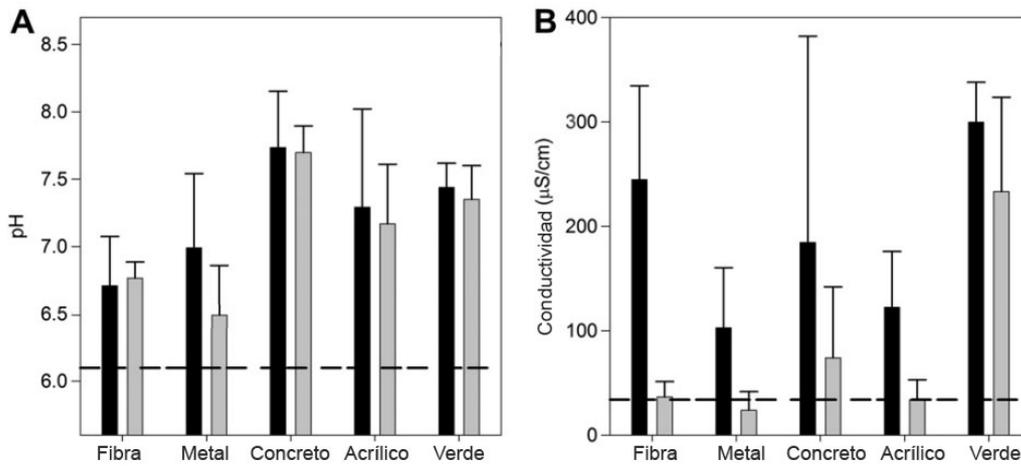


Figura 7-1 Promedio del pH (A) y la conductividad (B) para los eventos medidos en el modelo piloto. ■ Calidad de las primeras aguas separadas. ■ Calidad del agua en el tanque de almacenamiento. — — Muestras del ambiente (sin pasar por una superficie).

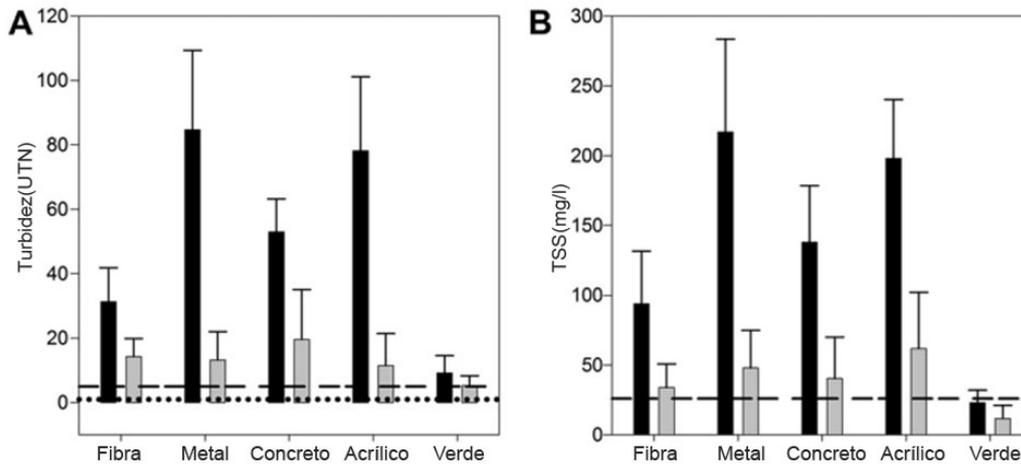


Figura 7-2 Promedio del Turbidez (UTN) (A) y la Solidos suspendidos (B) para los eventos medidos en el modelo piloto. ■ Calidad de las primeras aguas separadas. ■ Calidad del agua en el tanque de almacenamiento. — — Muestras del ambiente (sin pasar por una superficie).

Un estudio recopilatorio (Sánchez, Cohim, & Kalid, 2015) también nos da una idea general del rango de calidad para distintos parámetros en una gama de superficies. Por estudio estas son:

(Lee, Bak, & Han, 2012)	(Mendez, y otros, 2011)	(Yaziz, Gunting, Sapari, & Ghazali, 1989)
a.1 Tejas	b.1 Tejas de fibra de vidrio con recubrimiento asfáltico	c.1 Hierro galvanizado
a.2 Placas de concreto	b.2 Aluminio galvanizado	c.2 Placas de concreto
a.3 Tejas de arcilla	b.3 Placas de concreto	
a.4 Acero Galvanizado	b.4 Superficie acrílica	
	b.5 Techos verdes	

## *Parámetros de calidad del agua para el monitoreo mediante sensores*

Tabla 7-2 Calidad del agua en el sistema de separación de primeras aguas, esta calidad se toma de agua que no entra al sistema, es decir, es agua separada (Sánchez, Cohim, & Kalid, 2015).

	a.1)	a.2)	a.3)	a.4)	b.1)	b.2)	b.3)	b.4)	b.5)	c.1)	c.2)
pH	6.8	7.1	7.1	6.5	6.2	6.4	6.9	6.4	6.5	6.5	6.9
Turbidez (UTN)	n.m	n.m	n.m	n.m	32	85	53	78	10	22	56
TSS (mg/L)	214	309	219	286	45	105	70	95	12	91	153
Nitratos (mg/L)	3.3	2.5	1.9	2.8	2.5	1.1	1.5	1.5	1.0	n.m.	n.m.
T.C. (CFU/100 mL)	131	197	76	70	1050	300	700	1050	2.5	46	75
Al (µg/L)	227	535	243	622	950	650	650	1000	110	n.m.	n.m.
Fe (µg/L)	154	160	155	302	600	590	580	900	100	n.m.	n.m.
Cu (µg/L)	34	58	37	59	200	65	6.0	65	65	n.m.	n.m.
Pb (µg/L)	10	14	11	12	1.5	2.5	3.5	3.0	8.5	235	102
Zn (µg/L)	135	196	131	428	45	375	160	160	225	n.m.	49

Tabla 7-3 Calidad del agua después del sistema de separación de primeras aguas, esta calidad entra al sistema (Sánchez, Cohim, & Kalid, 2015).

	a.1)	a.2)	a.3)	a.4)	b.1)	b.2)	b.3)	b.4)	b.5)	c.1)	c.2)
pH	6.5	7.3	7	6.1	6.3	6.1	6.8	6.3	6.4	6.4	6.8
Turbidez (UTN)	n.m	n.m	n.m	n.m	13	13.09	20	10	5	10	24
TSS (mg/L)	36	45	42	15	15	25	20	30	8	52	95
Nitratos (mg/L)	0.3	0.3	2.8	0.02	0.4	0.4	0.5	0.5	0.6	n.m	n.m
T.C. (CFU/100 mL)	12	12	2	<1	500	150	300	500	2	25	41
Al (µg/L)	43	99	36	33	200	140	240	240	100	n.m	n.m
Fe (µg/L)	23	48	24	27	150	145	155	158	50	n.m	n.m
Cu (µg/L)	10	20	12	22	12.5	65	3	65	65	n.m	n.m
Pb (µg/L)	3	5	3	3	0.4	0.5	1.1	0.5	2	145	169
Zn (µg/L)	18	38	19	74	10	100	60	40	160	294	96

Sin tomar en cuenta aquellos que surgen de las calidades analizadas en el primer flujo, podemos establecer un rango de las calidades que podrían encontrarse después del separador a partir de los datos de las distintas investigaciones que se presentaron anteriormente.

Tabla 7-4 Rango de calidad del agua que podría encontrarse después del separado

	min.	máx.
pH	5.4	7.3
Turbidez (UTN)	5	35
TSS (mg/L)	8	150
Nitratos (mg/L)	0.02	4.7
T.C. (CFU/100 mL)	2	500
Al (µg/L)	33	240
Fe (µg/L)	23	158
Cu (µg/L)	3	65
Pb (µg/L)	0.4	169
Zn (µg/L)	1	294

## *Parámetros de calidad del agua para el monitoreo mediante sensores*

Aunque acotado, el rango sigue siendo bastante grande y puede deberse a la gran cantidad de incertidumbre de todos los fenómenos que existen alrededor de la captación de agua pluvial, y a que los separadores no suelen tener en cuenta eventos fuera de aquel para el que fueron diseñados. Uno de los objetivos de este trabajo es optimizar el funcionamiento del separador de primeras aguas de lluvia.

Mediante los sensores adaptados: específicamente el de turbidez, conductividad y el de pH es posible acotar aún más el rango de la calidad de agua que ingresa en el sistema, esta calidad se definió en una turbidez de 10 y un pH en un rango de 5.6 a 8.5. Se eligieron que estos rangos porque, en el caso del sensor de turbidez es una resolución mínima en el que se tienen datos confiables, con turbideces menores a este valor se presenta una cantidad de ruido muy significativa lo que hace inviable un valor menor. El agua de lluvia suele presentarse hacia un pH ácido, tomando equilibrio con el dióxido de carbono atmosférico alrededor de un valor de 5.6. debajo de este punto cualquier medición ya se consideraría una lluvia ácida, La AWC establece que el rango óptimo de agua bebible estaría entre 6 y 8.5

Con el funcionamiento del dispositivo se pueden fácilmente fijar estos valores en vías de alcanzar una calidad de agua bebible con tratamientos posteriores. Sin embargo, datos como el total de sólidos suspendidos, aunque altamente relacionado con el valor de turbidez, no son posibles de acotar con las tecnologías que se escogieron para este proyecto.

### 7.1.1. Sensores de calidad de agua

La EPA certifica métodos para determinar los parámetros de las pruebas pertinentes de calidad del agua. Una lista de métodos certificados está listada en su página web: “*Methods Approved to Analyze Drinking Water Samples to Ensure Compliance with Regulations*” (EPA, 2018)

La gran mayoría de estos métodos están fuera del alcance este proyecto. Por ejemplo, para el análisis de iones metálicos usando ICP-MS, además de conocimientos técnicos particulares el equipo tiene un precio que se acerca a los \$130 000 dólares. Hay sin embargo otros métodos que son razonablemente baratos y de uso sencillo, que otorgan buenos resultados sacrificando precisión de laboratorio (Gidahatari, 2015).

Los cationes metálicos ( $Mg^{+2}$ ,  $Ca^{+2}$ ,  $Fe^{+2}$ , etc.) y aniones ( $Cl^-$ ,  $SO_4^{-2}$ , etc.) pueden ser analizados con kits de reactivos colorimétricos relativamente baratos. Hay varias empresas que venden kits de reactivos de cambio de color de bajo costo, algunos de los cuales están certificados para su uso por la EPA, lo que significa que el método de ensayo ha sido validado y se puede confiar más en los resultados que da. Algunos kits tienen la ventaja de no requerir ningún instrumento adicional y los precios rondan entre \$30 a 50\$ por parámetro para 7-10 pruebas (Gidahatari, 2015).

La EPA también ha realizado una extensa revisión experimental de calidad del agua para evaluar su desempeño en varias condiciones de contaminación. La conclusión principal fue que muchos de

## *Parámetros de calidad del agua para el monitoreo mediante sensores*

los contaminantes químicos y biológicos tienen un efecto correlacional entre otros parámetros del agua que se monitorean, incluyendo la turbidez, el potencial de reducción de la oxidación, la conductividad eléctrica y el pH (HALL, y otros, 2007). Por lo tanto, es factible monitorear e inferir la calidad del agua al detectar cambios en dichos parámetros (Haas, Meyer, & Paller, 1983), (Yang, Haught, & Goodrich, 2009). Es así como los datos obtenidos por sensores pueden ser usados para la toma de decisiones en una variedad de temas de manejo.

Los sensores de bajo costo que pueden dar información en tiempo real sobre los parámetros de calidad del agua están bastante limitados. Actualmente hay algunas sondas para pH, turbidez y conductividad. La conductividad es probablemente el mejor parámetro para hacer una medición rápida de la calidad del agua porque es una medida directa y con una buena aproximación de los sólidos totales disueltos. Así que cuando se requieren medidas en tiempo real en alguna condición de flujo se puede monitorear la conductividad del agua; un aumento en sólidos disueltos totales es una buena indicación que la fuente de agua está contaminada.

**Sensor de turbidez:** Este tipo de sensores da una medición asociada a los sólidos suspendidos en el agua, generalmente su funcionamiento está basado en la medición de la cantidad de luz transmitida a través del agua. Se suele utilizar este tipo de sensores en ríos y arroyos, en aguas residuales, en flujos de control sobre los procesos de tratamiento de agua potable, en estanques de sedimentación, investigación de transporte de sedimentos y mediciones de laboratorio.

**Sensor de conductividad:** Estos miden la conductancia por medio de un circuito electrónico conectado a un sensor inmerso en la solución que se desea medir. El circuito empleado manda una tensión y lo que se mide es el tamaño de la señal resultante; que se asocia linealmente a la conductividad. Debido a que la conductividad varía de manera considerable con la temperatura, es esencial que las señales recibidas se corrijan con mediciones de temperatura.

Las mediciones de conductividad suelen ser usadas en procesos industriales con el fin de obtener información sobre la concentración de iones totales; que indicarían la presencia de compuestos disueltos en el agua. Las aplicaciones más comunes son la purificación de agua, y la medición de niveles de concentración en soluciones.

**Sensor de pH:** Otro parámetro que puede usarse para medir y controlar la calidad del agua es el pH. Por supuesto esta medición indica el nivel de acidez o basicidad del agua. Los componentes del sensor de pH generalmente se combinan en un dispositivo llamado electrodo de pH. Este electrodo es frecuentemente de vidrio y bastante frágil. Aunque últimamente se han desarrollado materiales que reemplazan al vidrio haciendo el sensor más duradero y eficiente.

Tabla 7-5 Algunos sensores de calidad de agua en el mercado.

Costo (USD)	Nombre	Rango	Precisión	Interfase	Referencia
<b>Conductividad</b>					
\$3	Three Dollar EC - PPM Meter [Arduino]	SD	SD	Arduino	(Ratcliffe, 2015)
\$50	Ohaus Starter Conductivity Pen-C65	0-1999	1 µS/cm	Visual	(Hogentogler, 2018)
\$50	Ohaus Starter Conductivity Pen-C66	0.00 - 10.00 mS/cm	0.01 mS/cm	Visual	(Hogentogler, 2018)
\$79	Milwaukee MW302 Series Portable	0.0-10.0 mS/cm	0.1 mS/cm	Visual	(Hogentogler, 2018)
\$101	Milwaukee MW301 Series Portable	0-1990 µS/cm	10 µS/cm	Visual	(Hogentogler, 2018)
\$109	Salinity Sensor	0-50000 ppm	3%	Arduino y otros	(Vernier, 2018a)
\$122	Vernier Conductivity Probe	0-20000 uS/cm	8%	Arduino y otros	(Vernier, 2018b)
\$166	Oakton PCTestr35	0-2000 uS/cm	0.1 uS/com	Visual	(Fisher Scientific, 2018a)
\$200	Atslas Scientific Electrical Conductivity Kit	0.55-500,000 µs/cm	± 2µs/cm	UART+I2C	(Sparkfun, 2018a)
\$79	Gravity: Analog Electrical Conductivity Sensor / Meter(K=10)	10~100 ms/cm	±5%	Arduino	(DFRobot, 2018a)
<b>pH</b>					
\$14	Newdy Digital PH Meter Tester	0-14	± 0.05	Visual	(Amazon, 2018a)
\$20	Milwaukee pH600 Economical Pocket pH Me 0-14	0-14	±0.1	Visual	(Milwaukee, 2018)
\$38	Hanna716435 Checker pHTester: HI98103 0-14	0-14	±0.01	Visual	(Amazon, 2018b)
\$55	General Tools PH501 Pocket pH Meter Kit 0-14	0-14	±0.2	Visual	(Toolexperts, 2018)
\$79	Go Direct pH Sensor	0-14	±0.2	LabView y otros	(Vernier, 2018c)
\$122	ExStick pH meter, H2O proof	0-14	±0.01	Visual	(Grainger, 2018a)
\$128	Pocket Pro+ pH Tester 9532000	0-14	± 0.02	Visual	(Hach, 2018a)
\$150	Atlas Scientific pH Sensor Kit	0-14	± 0.02	I2C+UART	(Sparkfun, 2018b)
\$166	Oakton PCTestr35	0-14	±0.1	Visual	(Fisher Scientific, 2018b)
\$956	Orion Star A221 portable pH meter	0-14	±0.002	Visual	(Fisher Scientific, 2018c)
\$50	Industrial pH Electrode - Armor Casing	0-14	±0.1	Arduino	(DFRobot, 2018b)
\$40	Gravity: Analog pH Sensor/Meter	0-14	±0.1	Arduino	(DFRobot, 2018c)
<b>TSS</b>					
\$5,895	TSS sc Suspended Solid InSitu Sensor	0.001 - 500 g/L	5%	UART+I2C	(Hach, 2018b)
<b>Turbidity</b>					
\$112	Turbidity Sensor	0-200 UTN	2 UTN	Arduino y otros	(Vernier, 2018c)
\$840	LCD Turbidity Meter	0-50, 50-1000 UTN	0.01 UTN	Visual	(Grainger, 2018b)
\$119	NeuLog Turbidity Sensor	0-200 UTN	0.08 UTN	Visual	(Carolina, 2018)
\$100	WGZ 1B Portable Digital Turbidimeter Turbidity Meter Nephelometer	0-200	1 UTN	Visual Visual	(JoyFay, 2018)
\$349	Turbidity Meter - 860040	0-50; 50-1000	0.01 UTN; 1UTN	Visual	(SperScientific, 2018)
\$138	Micro Portable Electronic turbidity meter 0-200	0-200	0.1 UTN	Visual	(AliExpress, 2018a)
\$120	WGZ-200AS Desktop MicroTurbidity 100-200	100-200	0.1 UTN	Visual	(AliExpress, 2018b)
\$169	Portable Electronic turbidity meter	0-20 UTN	0.01 UTN	Visual	(AliExpress, 2018c)
\$10	Gravity: Analog Turbidity Sensor For Arduino			Arduino	(DFRobot, 2018d)

# 8 Ingeniería de diseño del dispositivo

*“El agua dulce es preciosa, ya que no podemos vivir sin ella. Resulta irremplazable, dado que no tiene sucedáneos. Y es un recurso delicado, pues la actividad humana tiene un profundo impacto en la cantidad y calidad del agua dulce disponible”*

*Kofi Annan*

En la sección 5 y 6 se definieron algunas condiciones para el diseño del dispositivo, el propósito de este capítulo es mostrar la evolución de las alternativas del prototipo hasta llegar hasta una alternativa funcional y de las mejores condiciones posibles basadas en las suposiciones que se tienen, y dejando la posibilidad de variar las condiciones para posteriores investigaciones.

## 8.1. Resumen de las condiciones de diseño

A continuación, se establecen parámetros clave para el diseño del dispositivo y para la elección de sensores adecuados, el objetivo es apearse lo máximo a los rangos de la tabla 8-1,

Tabla 8-1 Resumen de rangos clave para iniciar el diseño de un dispositivo

Descripción	Límites
Altura del dispositivo	45-80 [cm]
Válvula de salida	¾”, 1”, 1”½
Sensor de turbidez	< 10 [UTN]
Sensor de pH	5.6 - 8.5
Volumen	80 ± 10 [ℓ]
Conductividad	<50 [μS/cm]
TSS	< 30 [mg/l]

La figura 8-1 representa el diagrama de flujo del funcionamiento básico. Sobre este es el que se conceptualizará el diseño final; aunque como se verá en los siguientes apartados, el diagrama de flujo final es mucho más complejo que este primer acercamiento.

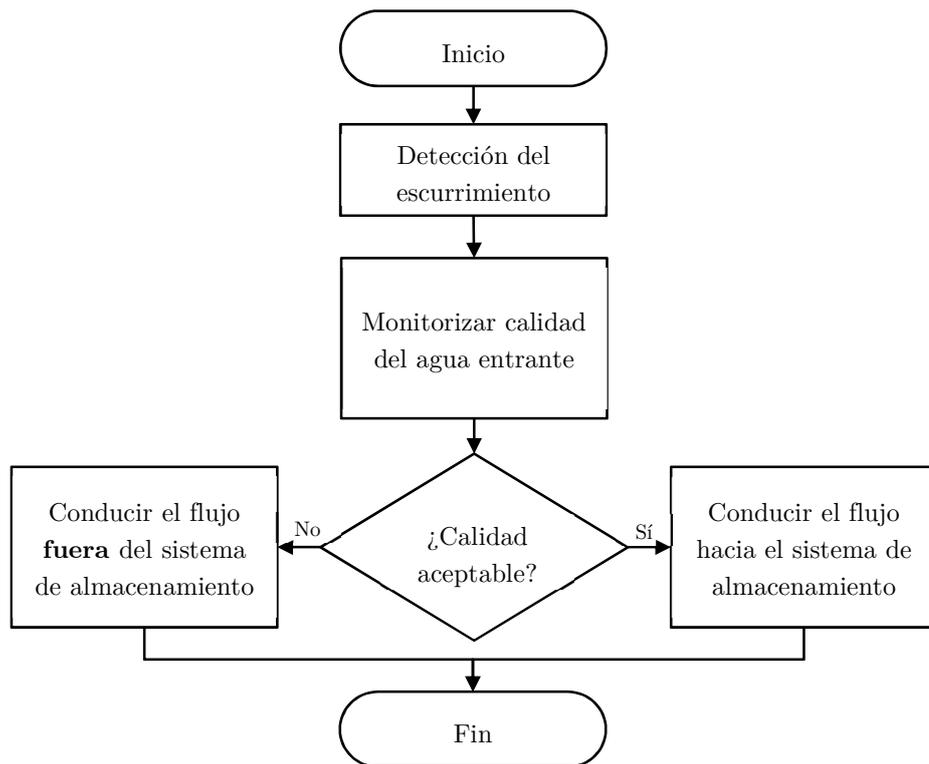


Figura 8-1 Diagrama de flujo con el que se inició el proceso de diseño.

## 8.2. Evolución del diseño conceptual del DISPLU

### 8.2.1. Diseño conceptual 1

El primero prototipo es una idealización de lo que se quiere que el sistema realice, solo contaba con lo indispensable sin tomar en cuenta posibles fallos en alguna parte del proceso, asimismo se ideó con el objetivo de ser lo más pequeño posible. Como resumen: es una Y, con un caudalímetro que registraría el flujo con dos fines: en primer lugar, iniciar todos los procesos lógicos que han de llevarse a cabo por el sistema de microcontrolador-sensores. En segunda instancia, almacenar los datos del caudal, con el fin de tener un registro preciso de la lluvia precipitada: la intensidad y el volumen total.

Incluso en este diseño conceptual, se tiene claro que se va a utilizar un sistema de prototipado por medio del microcontrolador Arduino, que resulta muy conveniente en este tipo de proyectos de prototipado.

La figura 8-2 representa el concepto del primer acercamiento hacia un diseño. En un principio, las válvulas estarían completamente cerradas, impidiendo el paso del flujo hacia cualquier vía: ya sea almacenamiento o drenaje. Una vez que el caudalímetro detectase flujo de agua se iniciaría un proceso para calcular, derivado de esos datos, un volumen dentro del sistema que a su vez conduciría a esperar un tiempo determinado para empezar a monitorizar los resultados del sensor de turbidez.

Llegado el punto que el sensor de turbidez se active, inicia el proceso analítico de discriminación basado en los datos que éste arroje.

Aunque este diseño conceptual se consideraría útil y tal vez podría desarrollarse mejor, se descartó su seguimiento por los siguientes puntos:

- Los caudalímetros comerciales de bajo coste no superan una apertura de ½ pulgada, lo que afectaría el gasto de salida, haciéndolo difícilmente adaptable para diversas condiciones.
- En este concepto no se considera un tanque de regulación que aumente la capacidad volumétrica que puede procesar el sistema.
- Es altamente probable que en esta configuración conceptual la turbulencia del agua sea un problema para la medición de valores por medio de sensores.
- No se cuenta con el suficiente espacio físico para hacer distintas mediciones.

La figura 8-3 muestra el diagrama de flujo modificado para adaptarse al funcionamiento de este diseño conceptual.

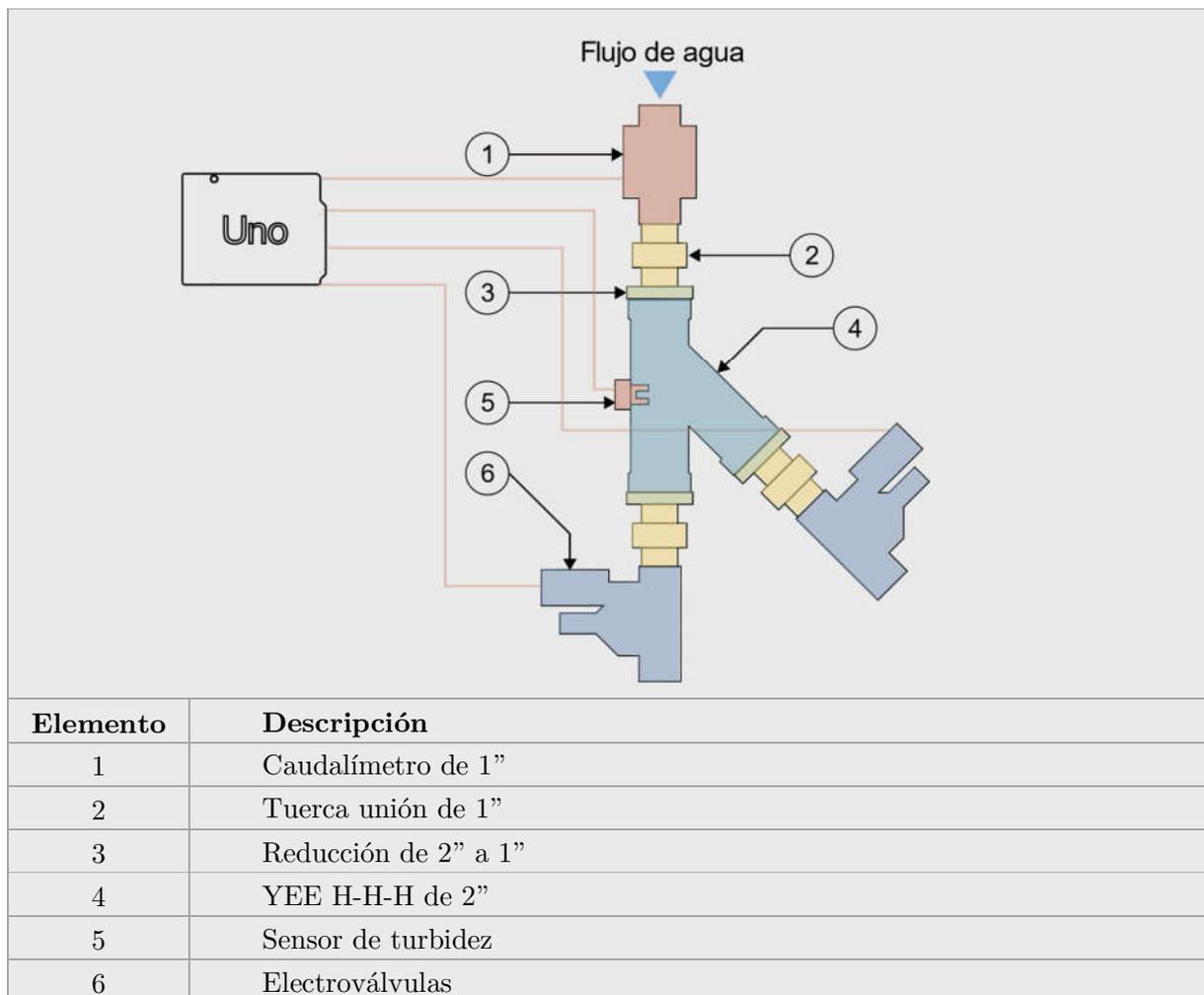


Figura 8-2 Primer diseño conceptual del DISPLU

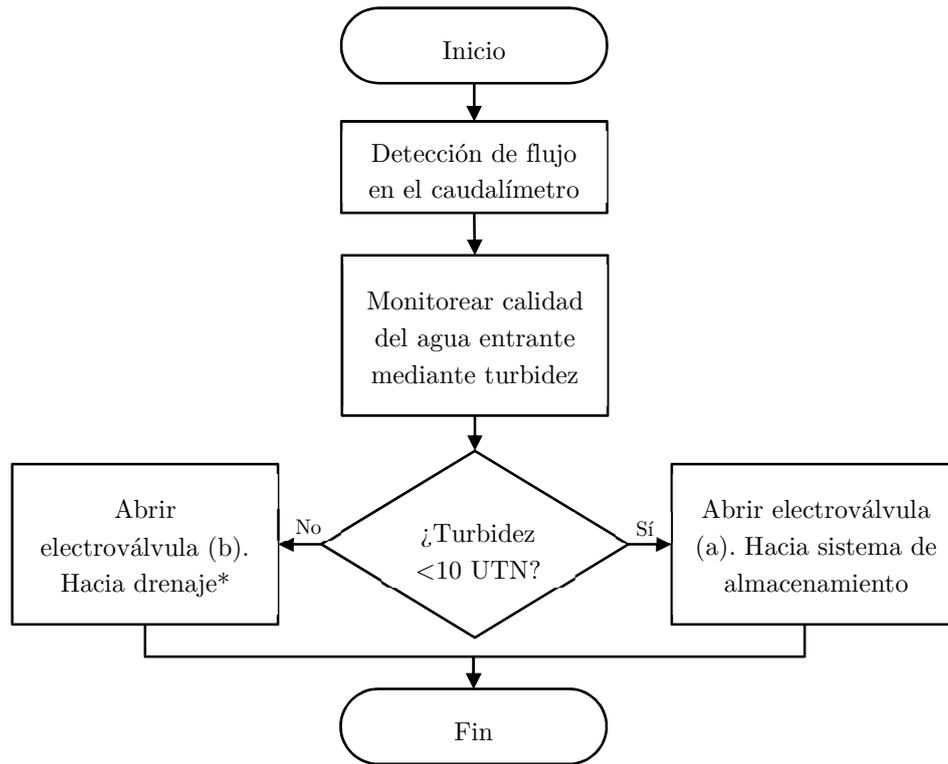


Figura 8-3 Diagrama de flujo adaptado al funcionamiento del primer diseño conceptual.

### 8.2.2. Diseño conceptual 2

Teniendo en cuenta las deficiencias del primer diseño conceptual, el proceso siguió hacia el diseño que ilustra la figura 8-4. El funcionamiento es esencialmente el mismo salvo algunas características importantes. Para este diseño se optó por usar electroneveles que detectasen el ingreso de agua al sistema, también se le implementó un tanque de regulación para evitar el problema de capacidad volumétrica.

Como parte del proceso de mejora, algunos errores y áreas de oportunidad se identificaron en este diseño y son las mismas que se intentan corregir en el diseño conceptual siguiente:

- La turbulencia del agua sigue siendo una preocupación que salvar.
- Dada la forma del tanque de almacenamiento es posible que se tengan problemas de estancamiento de agua.
- El diseño no es compacto y tiene muchas partes separadas que pueden dar lugar a fallos,
- No se tiene una obra de excedencias.

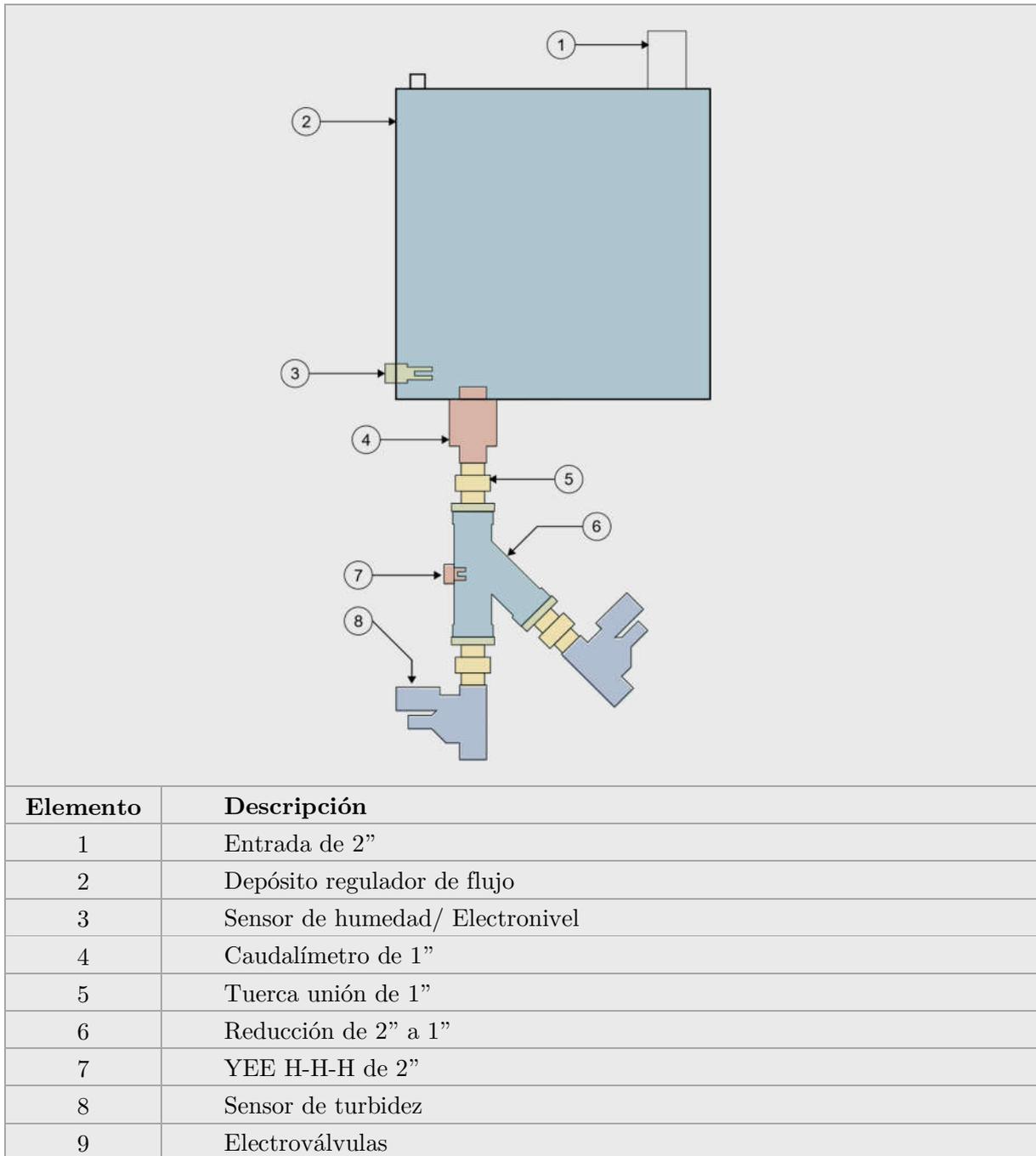


Figura 8-4 Segundo diseño conceptual del DISPLU

La figura 8-5 ilustra un diagrama de flujo que correspondería el funcionamiento básico de este prototipo. Como se ilustra, se sigue manteniendo la estructura general de funcionamiento, salvo la implementación de los electroniveles.

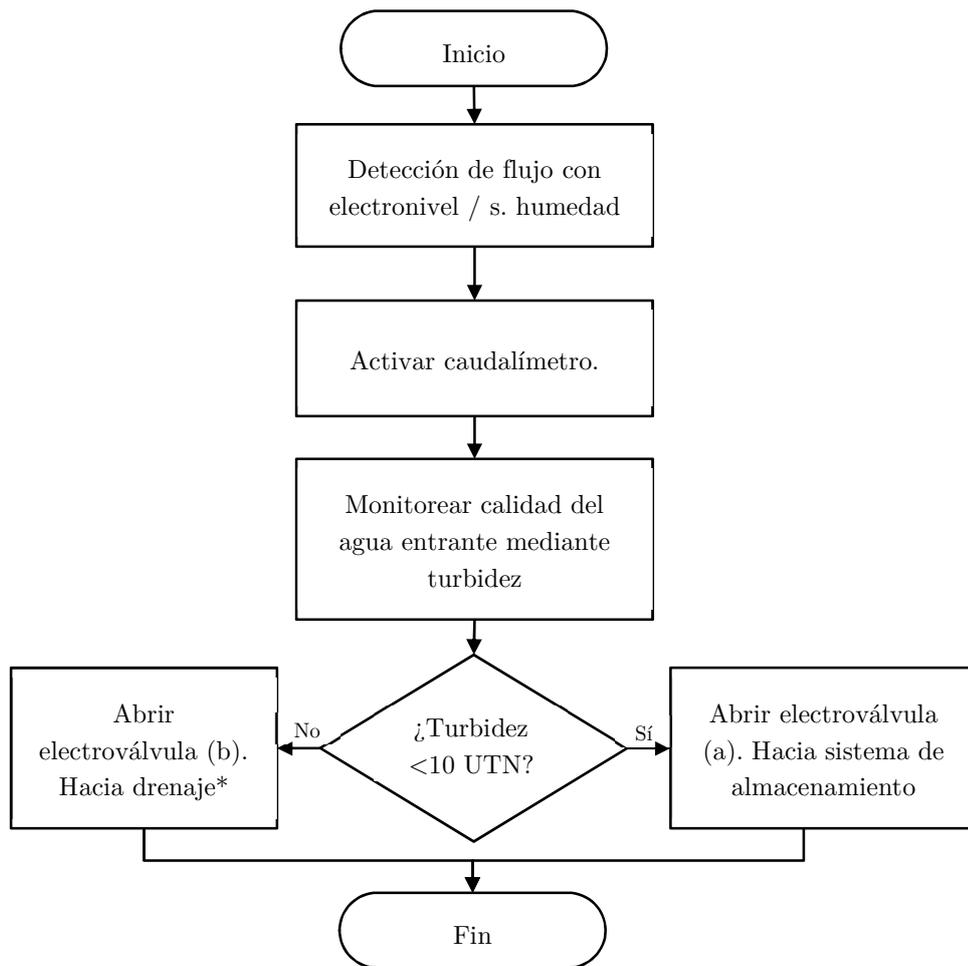


Figura 8-5 Diagrama de flujo del funcionamiento del dispositivo conceptual.

### 8.2.3. Diseño conceptual 3

Para el tercer diseño conceptual se ideó una forma más compacta del dispositivo, también se implementaron pendientes para agilizar el flujo y tratar de anular los riesgos del estancamiento de agua. Se ideó una forma de combatir los posibles efectos de la turbulencia del agua con la implementación de paredes perforadas, que en medio contendrían partículas para reducir la turbulencia. El diagrama de flujo de este dispositivo no difiere del presentado en la figura 8-5.

Cada vez es más evidente que se acerca la versión final de un prototipo funcional, es por eso que para este diseño se realizó un dimensionamiento más detallado mostrado el plano del diseño conceptual 3 (pág. 104). A partir de este punto las medidas del dispositivo se empezaron a bosquejar con el fin de encontrar otras debilidades en el diseño.

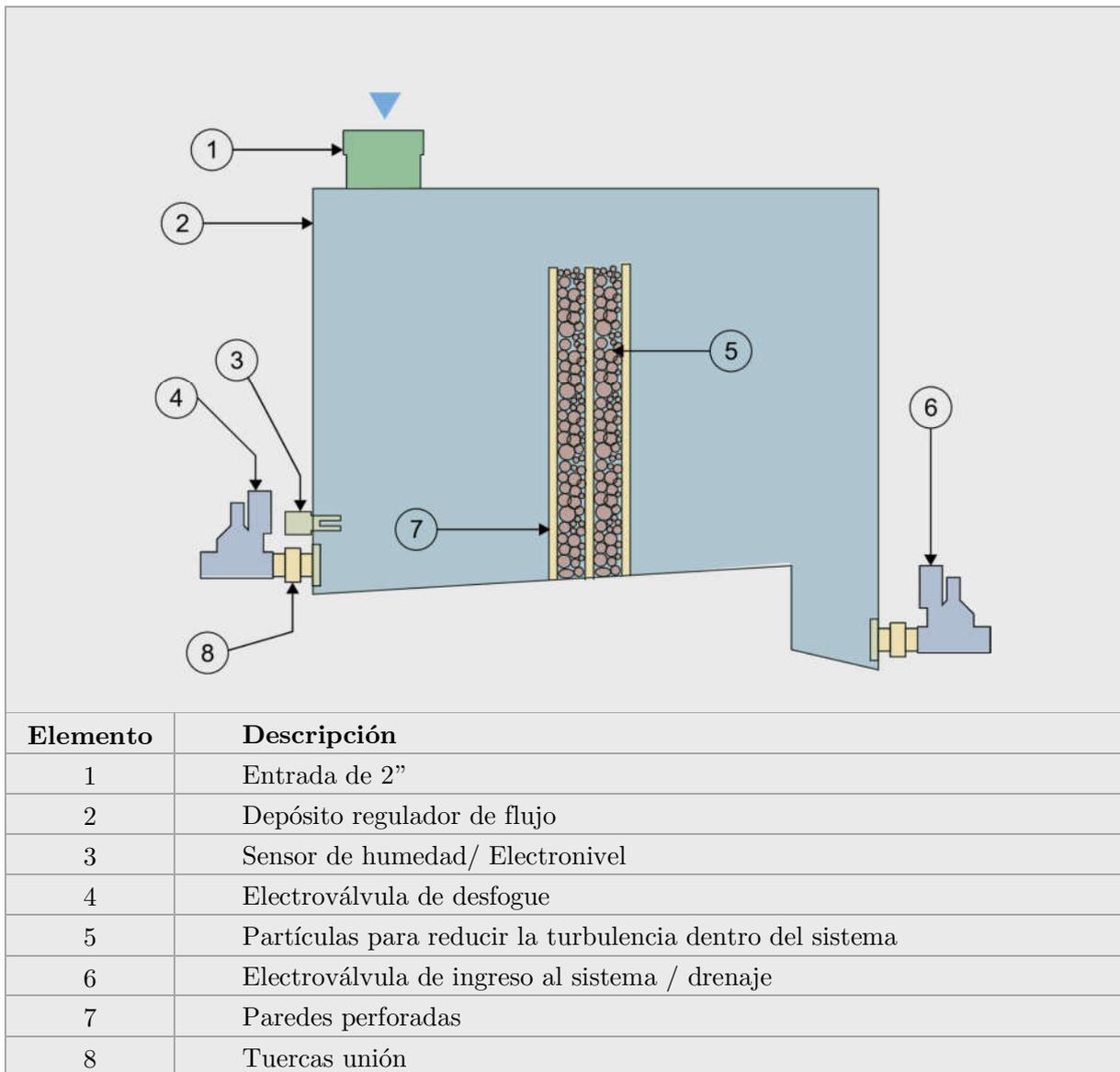
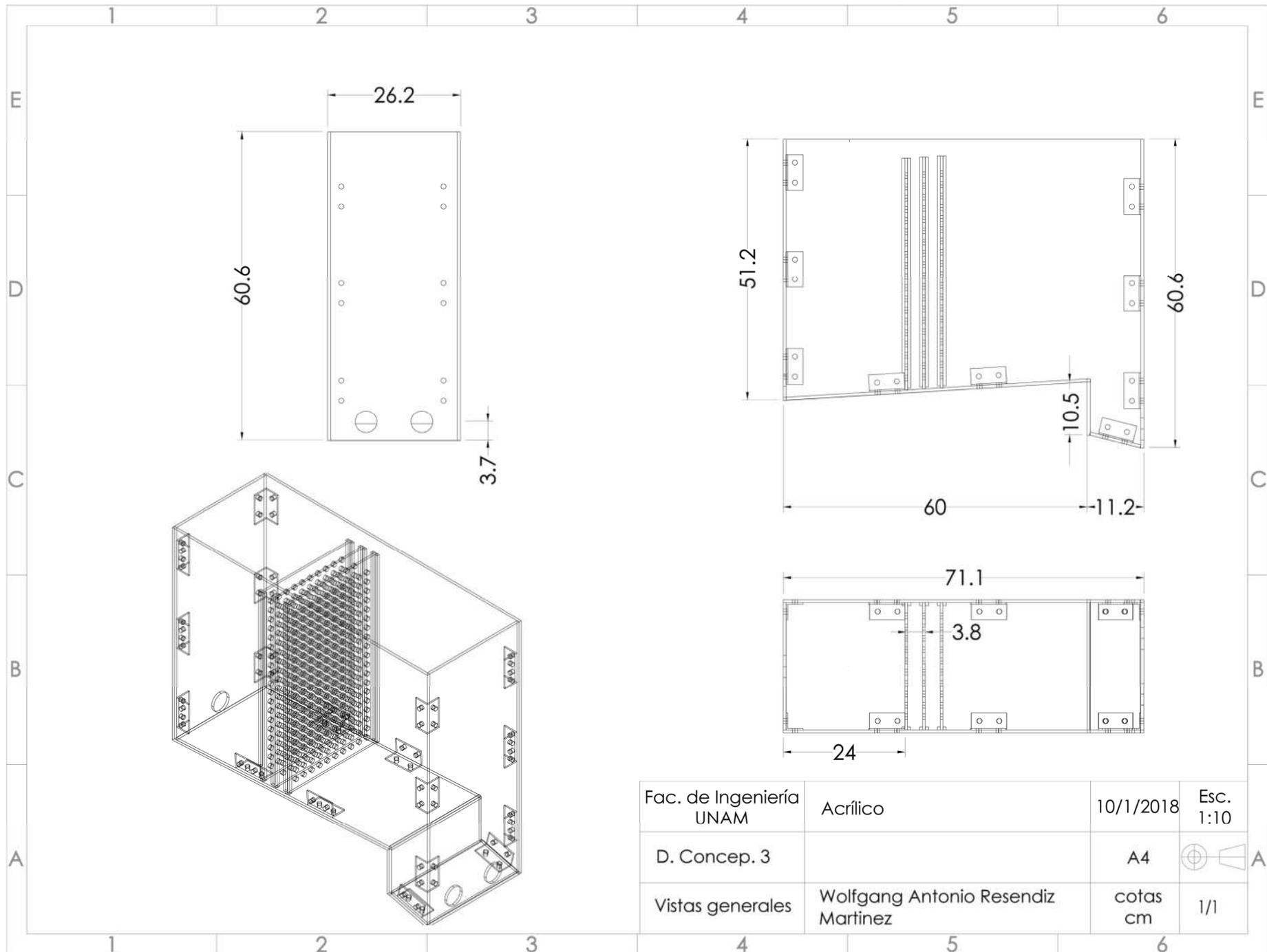


Figura 8-6 Tercer diseño conceptual del DISPLU

Las debilidades que se encontraron en este caso fueron.

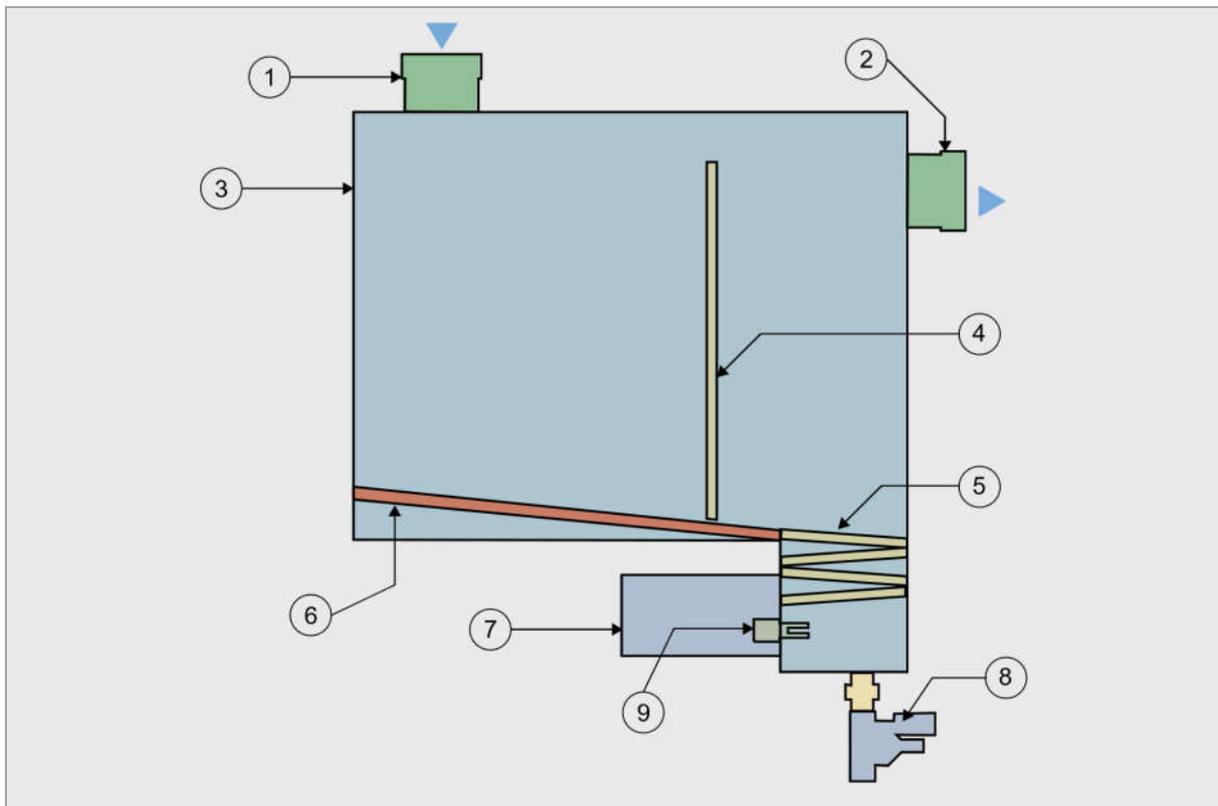
- El sistema de montaje del dispositivo por medio de tornillos de acrílico es deficiente, puede dar lugar a múltiples fugas.
- Se buscará reducir el número de electroválvulas, pues se están considerando 3.
- Las partículas que tienen como fin reducir la turbulencia añadirían peso extra al dispositivo, además es probable que se le tenga que hacer mantenimiento constante a estas mismas.
- Es difícil posicionarlo debido a su base con pendiente.



Fac. de Ingeniería UNAM	Acrílico	10/1/2018	Esc. 1:10
D. Concep. 3		A4	
Vistas generales	Wolfgang Antonio Resendiz Martinez	cotas cm	1/1

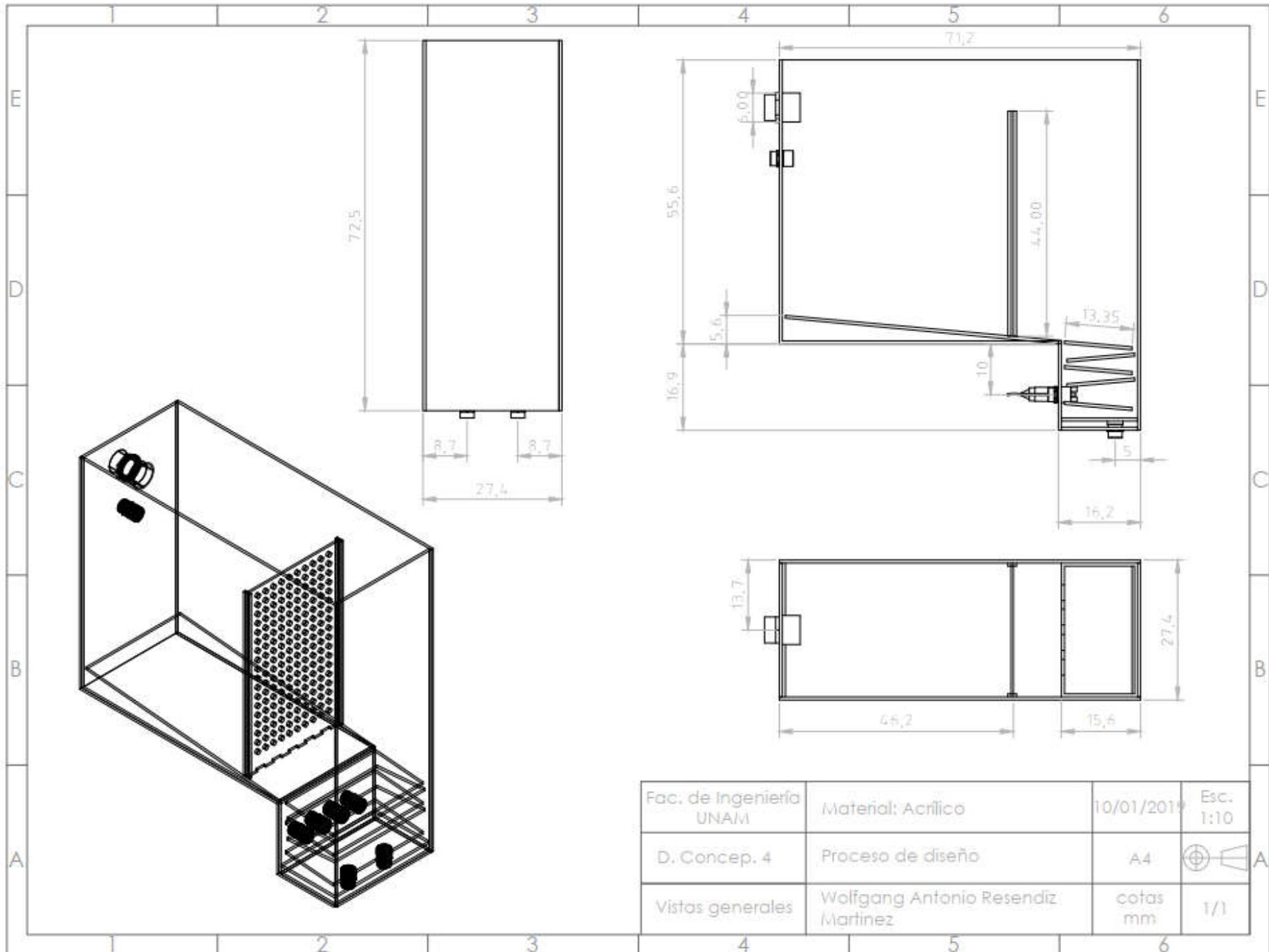
### 8.2.4. Diseño conceptual 4

El cuarto diseño conceptual y resolvió las deficiencias del anterior en varios sentidos: se cambió la idea de una base con inclinada con el fin de que se soportase mejor y que su construcción fuese más sencilla. Se le agregó también una cama inclinada por dentro del dispositivo para sustituir esta pendiente. Las paredes perforadas se cambiaron por una sola pared perforada, asimismo, no se incluirán canicas para evitar la turbulencia, en cambio se ideó el que el agua pasara a través de una especie de laberinto con el fin de propiciar la pérdida de energía y que el agua monitoreada sea una muestra volumétrica homogénea y estable.



Elemento	Descripción
1	Entrada de 2"
2	Salida de excedencias
3	Depósito regulador de flujo
4	Pared Perforada
5	Sistema para reducir la turbulencia
6	Placa interna para dar pendiente
7	Caja para los sensores
8	Electrovalvulas
9	Sensores

Figura 8-7 Cuarto diseño conceptual del DISPLU



Fac. de Ingeniería UNA/M	Material: Acrílico	10/01/2019	Esc. 1:10
D. Concep. 4	Proceso de diseño	A4	 A
Vistas generales	Wolfgang Antonio Resendiz Martinez	cotas mm	1/1

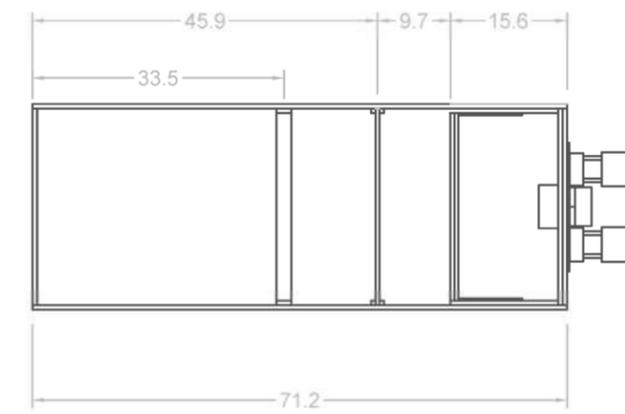
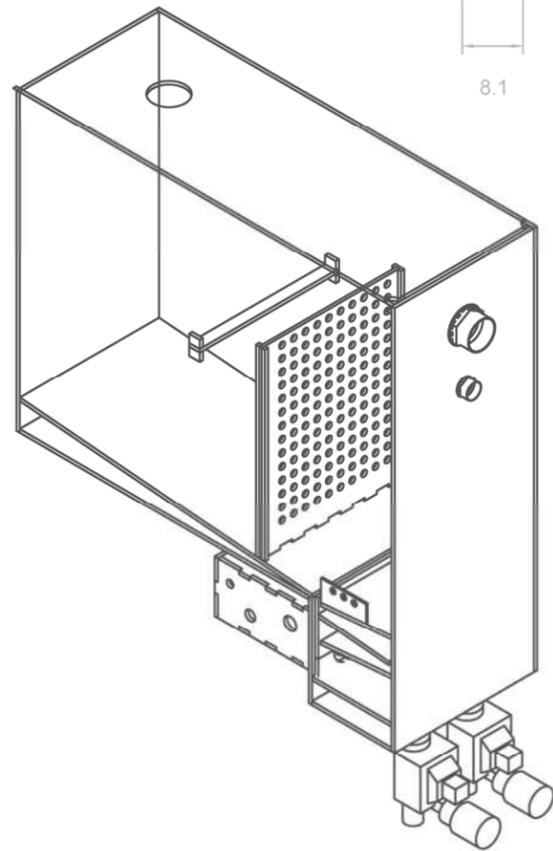
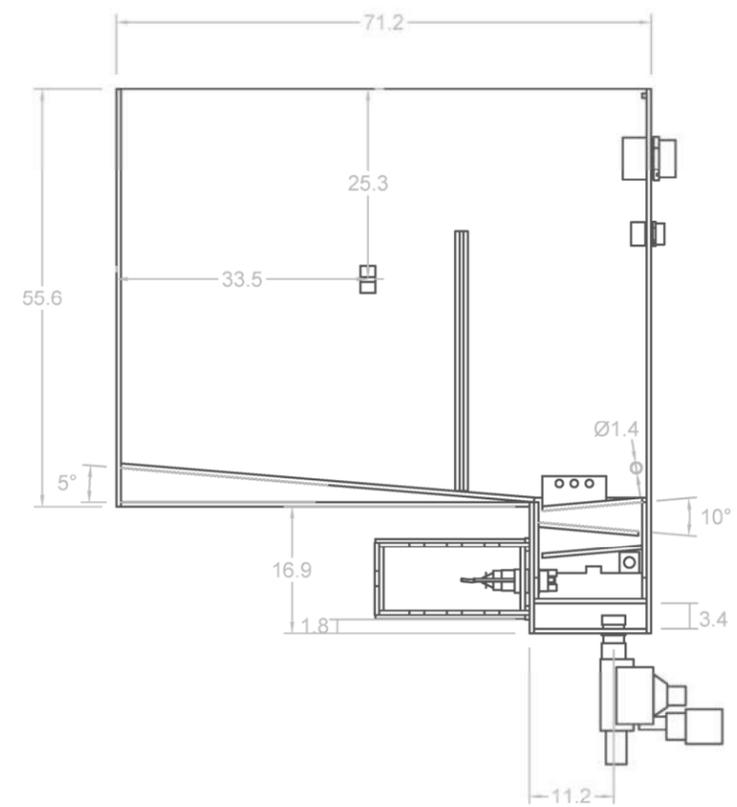
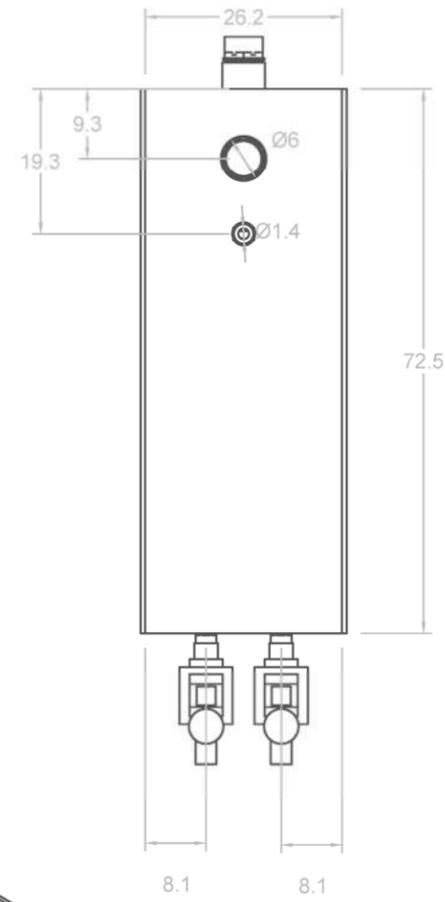
### 8.3. Prototipo final

A partir del diseño conceptual 4 resultó el diseño final. Del prototipo, el diseño final incluye, una caja de acrílico para guardar los sensores que se utilizarán.

Las características principales del prototipo son las siguientes:

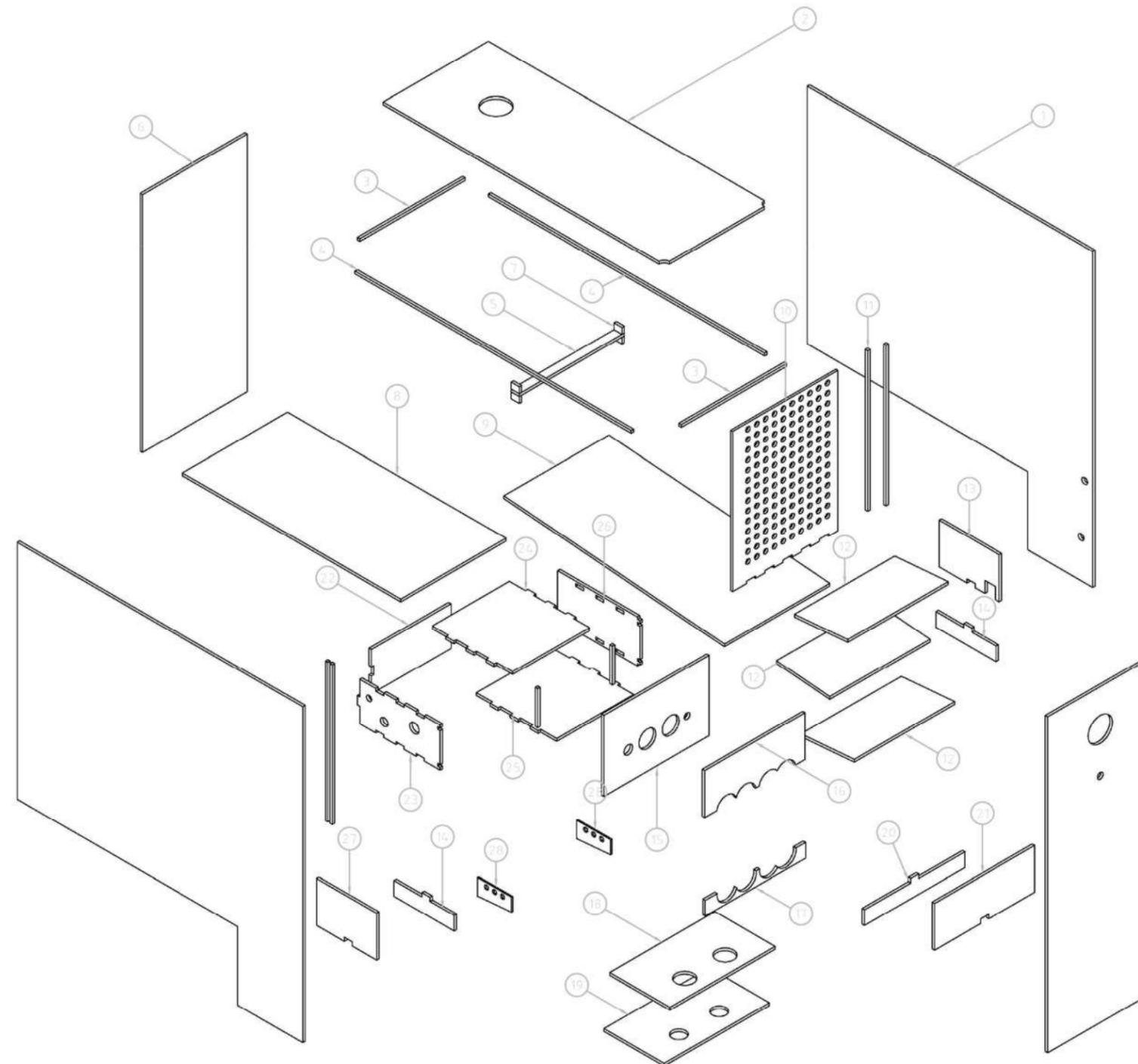
- No utiliza caudalímetros para medir el flujo de ingreso, en lugar de ello se utilizan tres electroniveles (por lo menos) para sensar el caudal.
- Se considera un tanque de regulación que aumenta la capacidad volumétrica que puede procesar el sistema.
- Se pretende amortiguar el problema de la turbulencia con las cámaras por donde pasará el agua.
- Se puede adaptar a varios tamaños de techos.
- No se perciben problemas de estancamiento de agua.
- Se tiene una obra de excedencias.
- Es sencillo instalarlo debido a su base plana.

Los planos del dispositivo final se presentan en las dos siguientes páginas, el desgloce pieza por pieza está detallado en la sección de anexos 12.1



Fac. de Ingeniería UNAM	Material: Acrílico	7/01/2019	Esc. 1:10
Diseño final	Proceso:	A3	⊕ A
Vista general	Wolfgang Antonio Resendiz Martínez	cotas cm	1/32

Nº Elemento	Nombre	Cantidad
1	Pared lateral (DER)	1
2	Tapa superior	1
3	Barras sostén (b)	2
4	Barras sostén (a)	2
5	Atiesador	1
6	Pared trasera	1
7	Barras sostén (c)	4
8	Base mayor	1
9	Piso p/pendiente	1
10	Pared perforada	1
11	Barras sostén (d)	4
12	Placas antiturbulencia	3
13	Pared caja turbulencia (a)	1
14	Pared caja turbulencia (b)	2
15	Pared sensores	1
16	Pared caja turbulencia (c)	1
17	Pared caja turbulencia (d)	1
18	Piso caja turbulencia	1
19	Base menor	1
20	pared caja turbulencia (e)	1
21	Pared caja turbulencia (f)	1
22	Pared caja sensores (a)	1
23	Pared caja sensores (b)	1
24	Pared caja sensores (c)	1
25	Pared caja sensores (d)	1
26	Pared caja sensores (e)	1
27	Pared caja turbulencia (g)	1
28	Agarradera	2
29	Pared lateral (IZQ)	1
30	Pared frontal	1



Fac. de Ingeniería UNAM	Material: Acrílico	7/01/2019	Esc. 1:10
Diseño final	Proceso:	A3	
Desgloce piezas	Wolfgang Antonio Resendiz Martinez	cotas cm	1/32

## 8.4. Simulación del funcionamiento del DISPLU

Es de sumo interés modelar cómo se comportará el DISPLU ante distintos esquemas de precipitación, para esta labor fue fundamental hacer ciertas suposiciones y limitar los detalles del modelo a los más relevantes.

En primer lugar, se declinó la idea de modelar una tormenta completa, pues en el mejor de los casos podríamos trabajar con un modelo de intensidad de lluvia triangular, que si bien simplificaría el fenómeno aún presenta cambios que harían difícil el análisis de los límites del DISPLU. Es por ello que, aunque irreal, se modeló un gasto de entrada constante, con el fin de analizar cómo se comportaría ante situaciones extremas, donde se presente una intensidad dada durante mucho tiempo. El DISPLU ya tiene un gasto de salida dependiente de la lámina de agua sobre el orificio. Por lo que se hizo un análisis de continuidad de flujo tomando en cuenta ambos fenómenos y la interdependencia de cada uno, cabe también mencionar que la lámina sobre el orificio se tomó en cuenta desde la salida de la válvula, como se muestra en la figura 8-8. Por lo tanto, la altura máxima de la lámina de agua es de 76 cm. Que se traduce en un volumen de 80 litros antes de desbordarse.

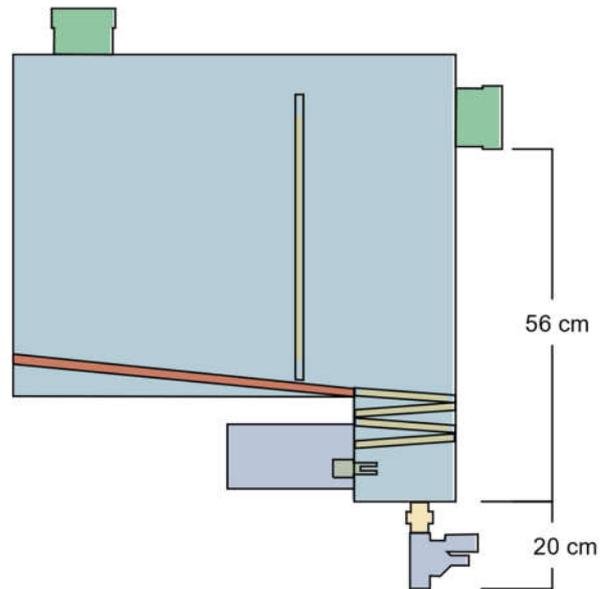


Figura 8-8 Esquema del DISPLU para modelar las entradas y salidas

## 8.1. Metodología para la simulación del funcionamiento

En cierto modo, el DISPLU se comporta como una presa, un tanque o una laguna de regulación. Por lo que simular su funcionamiento es posible con los fundamentos del método de tránsito de avenidas.

Se hace uso de la ecuación de continuidad:

$$Q_e - Q_s = \frac{dV}{dt} \quad \text{ec. (8.1)}$$

Donde

$Q_e$  = Gasto de entrada

$Q_s$  = Gasto de salida

$\frac{dV}{dt}$  = Variación del volumen almacenado en el tiempo

Que expresado en diferencias finitas es:

$$\frac{(Qe_i + Qe_{(i-1)})}{2} - \frac{(Qs_i + Qs_{(i-1)})}{2} = \frac{V_i - V_{i-1}}{dt} \quad \text{ec. (8.2)}$$

Tenemos también que  $Qs_i$  es función de la lámina (h)de agua sobre la salida; y sabemos que:

$$\begin{cases} h_i(\text{cm}) = (V_i + 24.8196053275) \frac{1}{1.826743646461} & \forall V_i > 8.061 (l) \\ h_i(\text{cm}) = (V_i + 0.3530909091) \frac{1}{0.3864545455} & \forall V_i > 8.061 (l) \end{cases} \quad \text{ec (8.3)}$$

Por otro lado, de la tabla 6-2 tenemos los datos del área de cada válvula. Se analizará por separado el comportamiento del DISPLU para 4 tamaños de electroválvulas distintas

### 8.1.1. Simulación con electroválvula de 1/2 “

La figura 8-9 es una representación gráfica del comportamiento Tiempo-Gasto-Volumen. Como se mencionó anteriormente, supongamos que el gasto de entrada es constante, en una situación como esa, al variar el gasto de entrada variará también el tiempo que se alcanza en llegar al límite

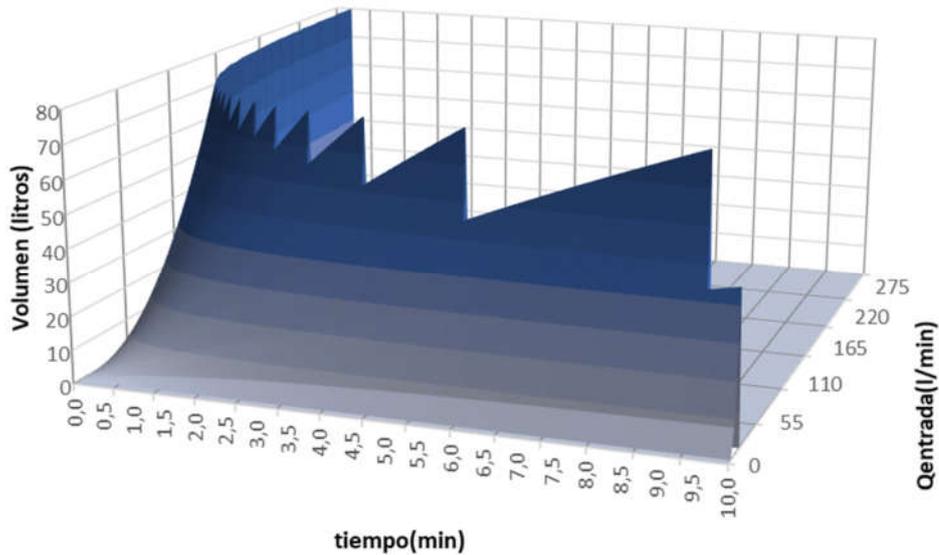


Figura 8-9 Comportamiento del volumen de agua dentro del DISPLU en función del gasto de entrada y el tiempo

volumétrico del DISPLU, por lo tanto, la figura 8-9 representa el comportamiento de estas tres variables, siendo el volumen de 80 litros el límite superior, pasado ese volumen, el DISPLU desborda.

La figura anterior se realizó con las ecuaciones (8.2) y (8.3) y es útil para definir cómo se comporta en el tiempo el DISPLU bajo cualquier gasto de entrada. Ahora supongamos que deseamos saber cuáles son las condiciones máximas para las que el DISPLU, con una electroválvula de ½”, puede funcionar sin verse sobrepasado en capacidad volumétrica, para ello definimos un tiempo máximo de un minuto, y de la figura 8-10 se ve claramente que en ese tiempo, el máximo gasto que puede soportar es de  $Q_{\max(1 \text{ min})}=80$  (l/min).

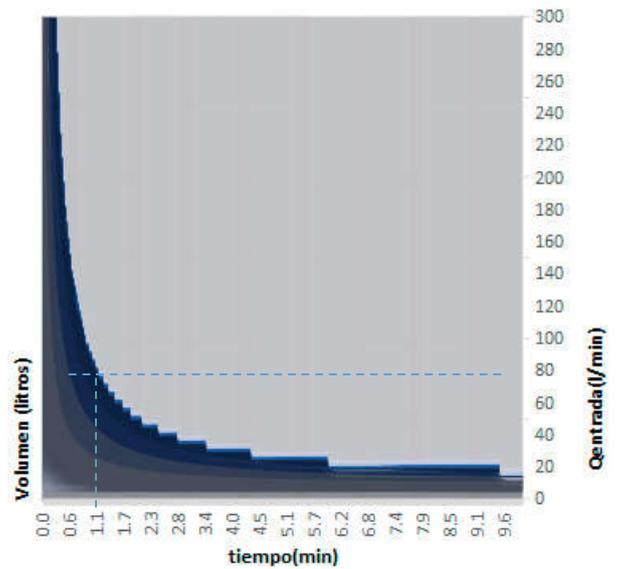


Figura 8-10 Proyección en (XY) del comportamiento del displu

Con el gasto  $Q_{\max(1 \text{ min})} = 80$  (l/min) podemos acotar la gráfica de gasto(intensidad, área) que se mostró en la figura 6-9. Para tener un modelo claro de las limitaciones en intensidad y área de captación que tiene el DISPLU con esta electroválvula (Figura 8-11)

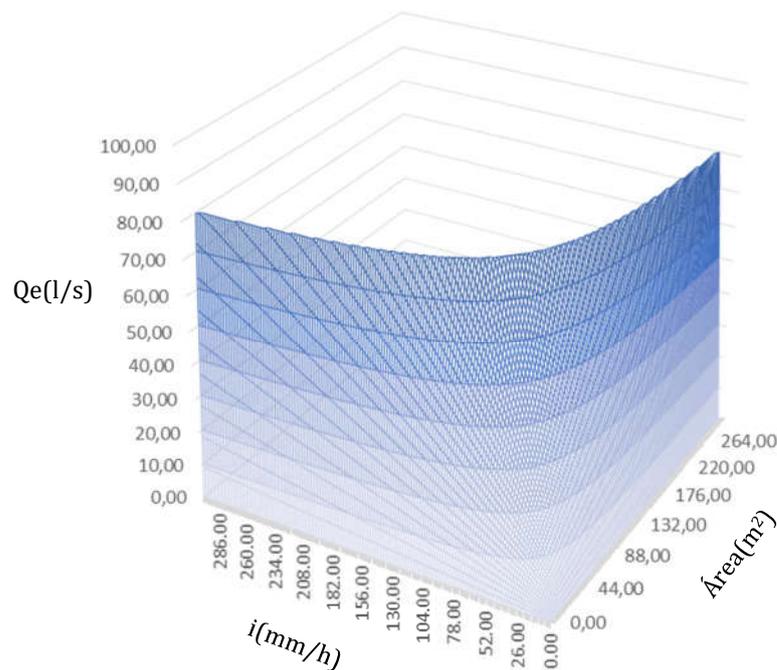


Figura 8-11 Límites de área de captación e intensidad de lluvia

8.1.2. Simulación con electroválvula de 3/4"

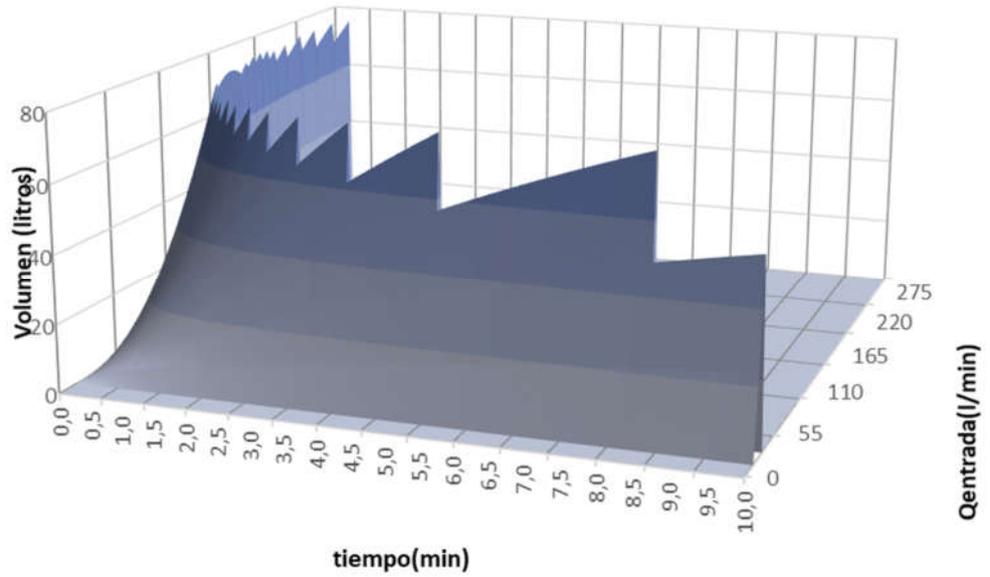


Figura 8-12 Comportamiento del Volumen de agua dentro del DISPLU en función del gasto de entrada y el tiempo para electroválvula de 3/4"

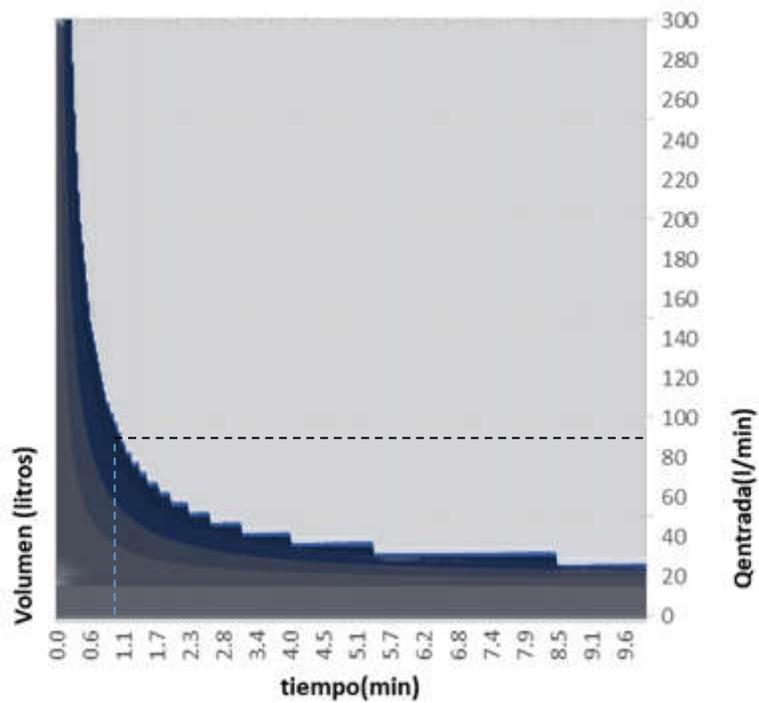


Figura 8-13 Proyeccion en (XY) del comportamiento del displu con una electrovalvula de 3/4"

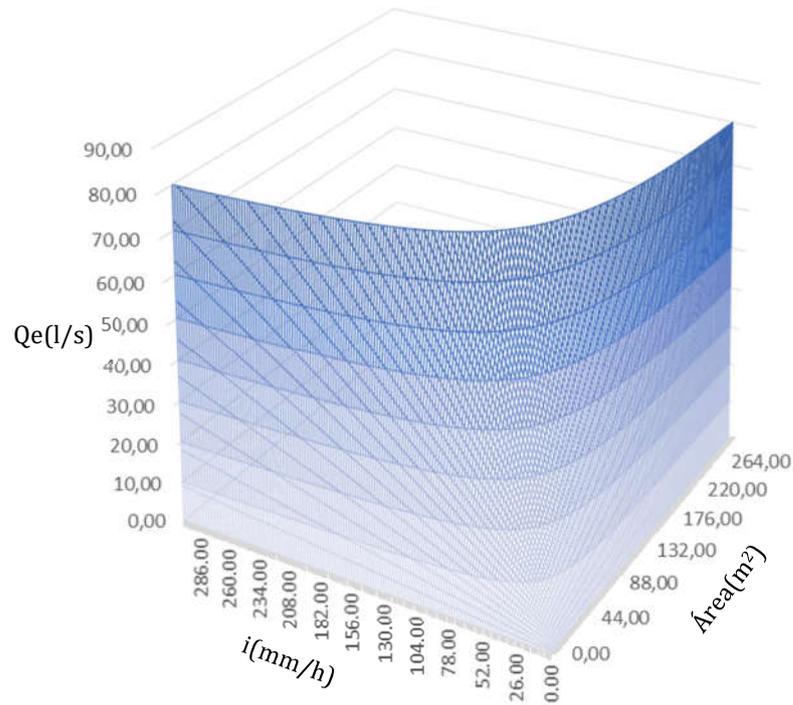


Figura 8-14 Límites de área de captación e intensidad de lluvia del DISPLU para una electroválvula de 3/4"

### 8.1.3. Simulación con electroválvula de 1"

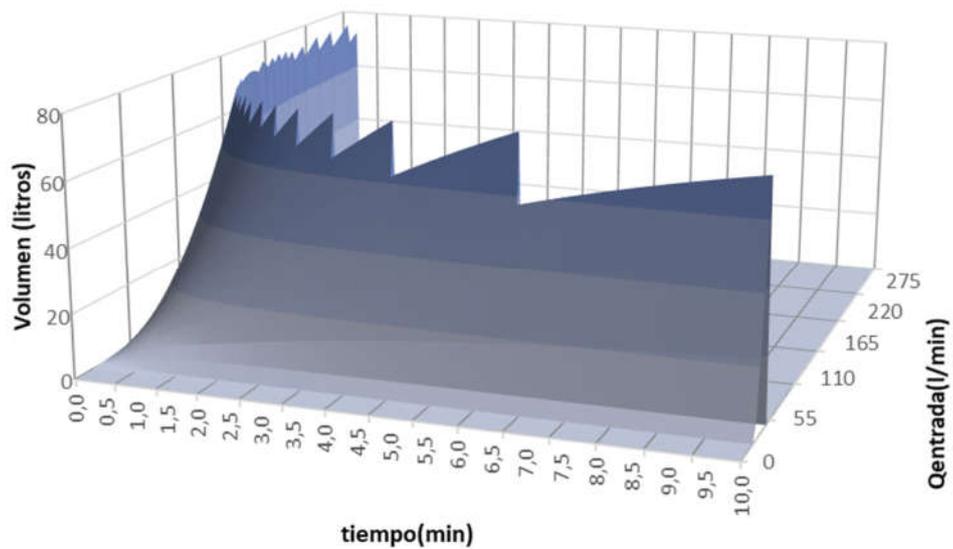


Figura 8-15 Comportamiento del Volumen de agua dentro del DISPLU en función del gasto de entrada y el tiempo para electroválvula de 1"

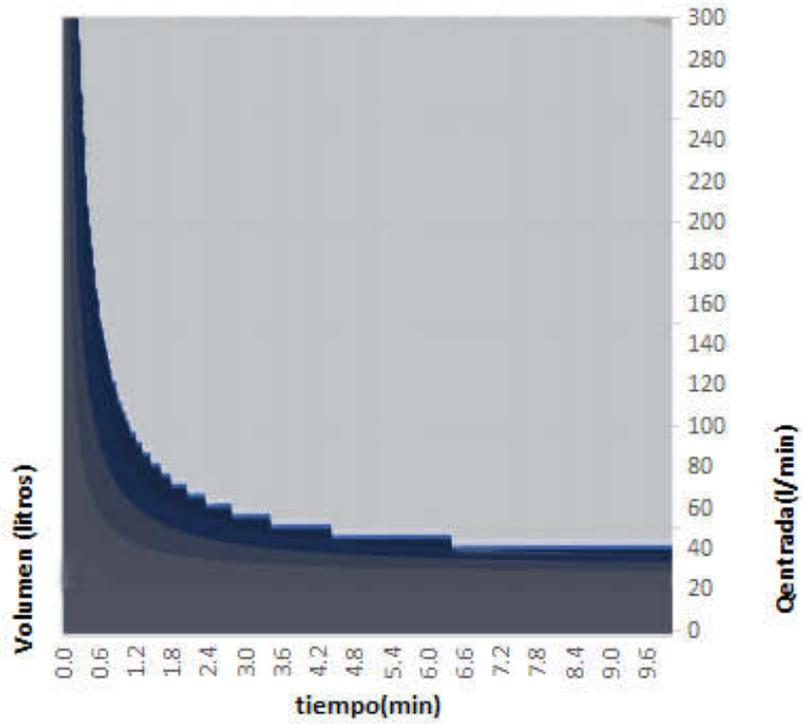


Figura 8-17 Proyeccion en (XY) del comportamiento del DISPLU con una electroválvula de 1"

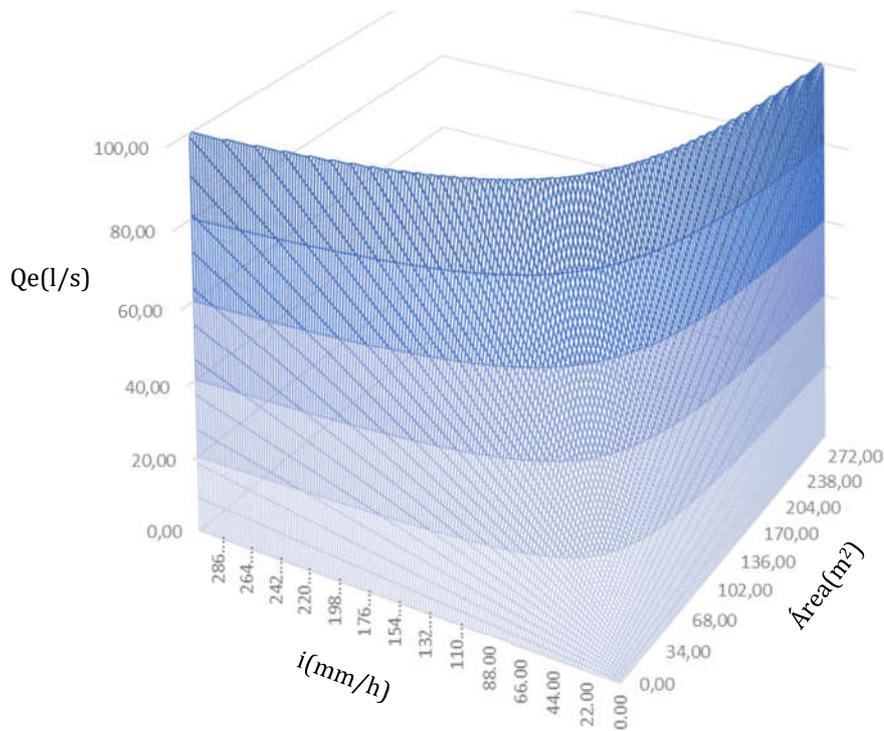


Figura 8-16 Límites de área de captación e intensidad de lluvia del DISPLU para una electroválvula de 1"

8.1.4. Simulación con electroválvula de 1 1/2”

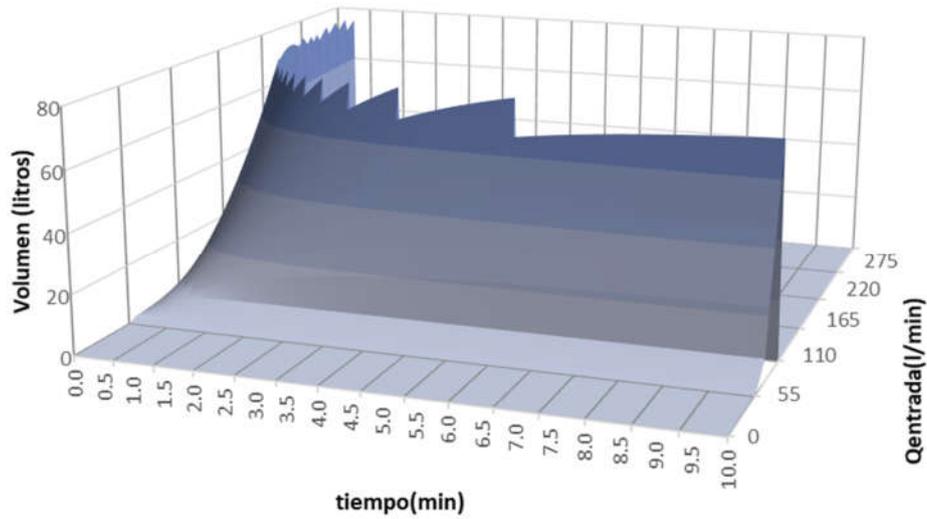


Figura 8-18 comportamiento del Volumen de agua dentro del DISPLU en función del gasto de entrada y el tiempo para electroválvula de 1 1/2”

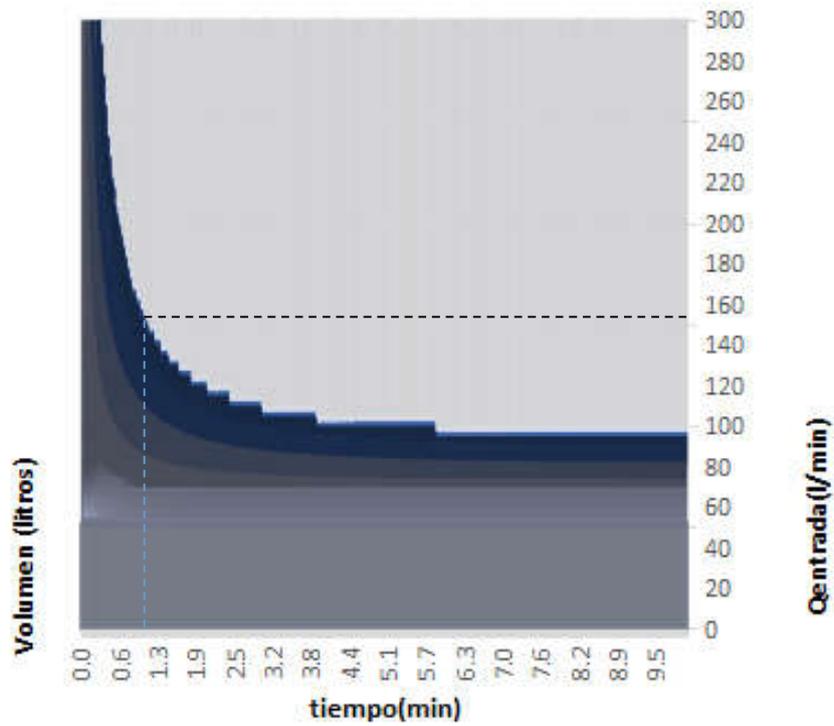


Figura 8-19 Proyeccion en (XY) del comportamiento del DISPLU con una electroválvula de 1 1/2”

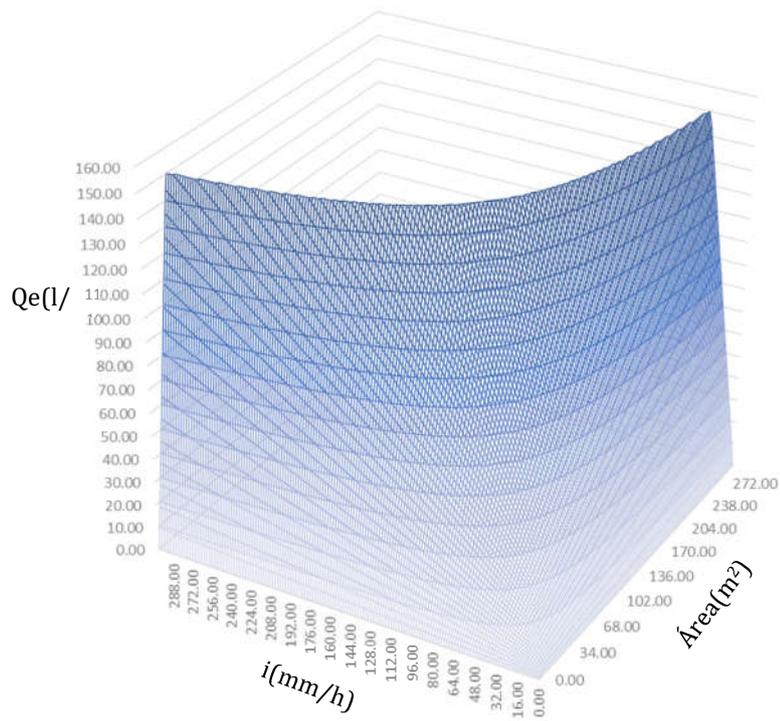


Figura 8-20 Límites de área de captación e intensidad de lluvia del DISPLU para una electroválvula de 1 1/2"

# 9 Electrónica del prototipo

---

*“Filthy water cannot be washed.”*

*Proverbio africano*

Esta sección surge de la necesidad de trabajar con sistemas electrónicos, específicamente con microcontroladores y sensores. No es el objetivo desarrollar particularidades de los métodos de programación o implementación que se utilizaron, ni presentar los conceptos básicos de la electrónica que sin duda se aplicaron en este proyecto. Sólo se busca establecer una visión general del funcionamiento de los prototipos en Arduino, y en mayor medida presentar el trabajo que se realizó.

## 9.1. Desarrollo de prototipos con microcontroladores comerciales.

La industria del hardware está creciendo a un ritmo sin precedencia, cada vez más compañías están desarrollando productos innovadores y en parte es gracias a que tenemos mejores herramientas para prototipado, de la mano de un acceso sencillo a estas y el conocimiento de cómo utilizarlas.

### 9.1.1. Computadoras y microcontroladores

Una computadora es un dispositivo que puede ser programada para seguir secuencias de operaciones aritméticas o lógicas. En décadas recientes también se ha adaptado el término de microcomputadoras, que es básicamente una computadora de pequeñas dimensiones que utiliza un microprocesador como CPU. Esta palabra viene de los inicios de la computación digital, donde las computadoras eran gigantescas y se adaptó el término con fines de diferenciación.

Bajo el mismo campo semántico está el concepto de microcontrolador, que se define como un circuito integrado programable capaz de ejecutar las instrucciones grabadas en su memoria. Por lo general se utilizan para hacer tareas repetitivas y sencillas. Se puede hacer una simplificación y decir que un microcontrolador es una computadora de capacidades limitadas, generalmente de bajo consumo y costo.

### 9.1.2. Arduino UNO

En su web Arduino se describe como una interfaz entre la computadora y el mundo exterior. Esta definición queda completa añadiendo que Arduino se puede programar para que realice acciones de manera autónoma y eficiente. El microcontrolador ATmega328, usado por Arduino es utilizado por distintas industrias para realizar acciones automatizadas. La tabla 9-1 desarrolla las características del microcontrolador citado anteriormente.

Tabla 9-1 Características del chip ATmega328. Extraído (Wikipedia, 2018)

Parámetros	Valores
Flash	32 Kbytes
SRAM	2 Kbytes
Cantidad Pines	28
Frecuencia máxima de operación	20 MHz
CPU	8-bit AVR
Pines máximos de E/S	23
Interrupciones internas	24
Canales ADC	8
Resolución de ADC	10
Eeprom	1K
Canales PWM	6
Voltaje de operación	1.8-5.5 v
Timers	3

Los principales elementos que deben saberse al trabajar con la placa Arduino UNO son:

**Pines digitales:** Los puertos digitales pueden ser utilizados como entradas o salidas de propósito general. En el lenguaje C adaptado para la placa se pueden utilizar con las funciones `pinMode()`, `digitalRead()` y `digitalWrite()`. Cada terminal tiene una resistencia pull-up que puede activarse o desactivarse. cuando el pin está configurado como entrada. La corriente máxima por salida es 40 [mA].

- Serial: 0 (RX) y 1 (TX): Utilizado para recibir (RX) y transmitir (TX) datos serie TTL.
- Interrupciones externas: 2 y 3: Estas terminales pueden ser configuradas para disparar una interrupción con un valor bajo, un pulso de subida o bajada, o un cambio de valor. Con la función `attachInterrupt()`.
- PWM: 3, 5, 6, 9, 10, y 11: Proporcionan salidas PWM (Pulse Width Modulation) de 8 bit con la función `analogWrite()`.
- SPI: 10(SS), 11(MOSI), 12(MISO), 13(SCK): Estas terminales soportan comunicación SPI.

- LED: 13 : Hay un led en placa conectado al pin digital 13. Cuando el pin tiene valor high, el led está encendido, cuando el pin está en low, está apagado.

**Pines analógicos:** Los pines de entrada analógicos soportan las conversiones analógico digital (A/D) de 10 bits utilizando la función `analogRead()`. En general las entradas analógicas tienen la característica de poder ser utilizadas como pines digitales salvo en algunas excepciones, por lo que se sugiere revisar a detalle la ficha técnica:

- I2C: 4(SDA) y 5(SCL). Soportan comunicaciones I2C (TWI) utilizando la librería `Wire`.

**Pines de alimentación:**

- VIN: Es el voltaje de entrada a la placa Arduino cuando se está utilizando una fuente de alimentación externa (diferente de los 5 [v] de la conexión USB o de otra fuente de alimentación regulada). Se puede suministrar voltaje a través de este pin.
- 5V: La alimentación regulada utilizada para alimentar el microcontrolador y otros componentes de la placa. Esta puede venir de VIN a través de un regulador en placa o ser proporcionada por USB u otra fuente regulada de 5V.
- GND: Pines de tierra.

La figura 9-1 hace un desglose de los pines y sus funciones con más detalle.

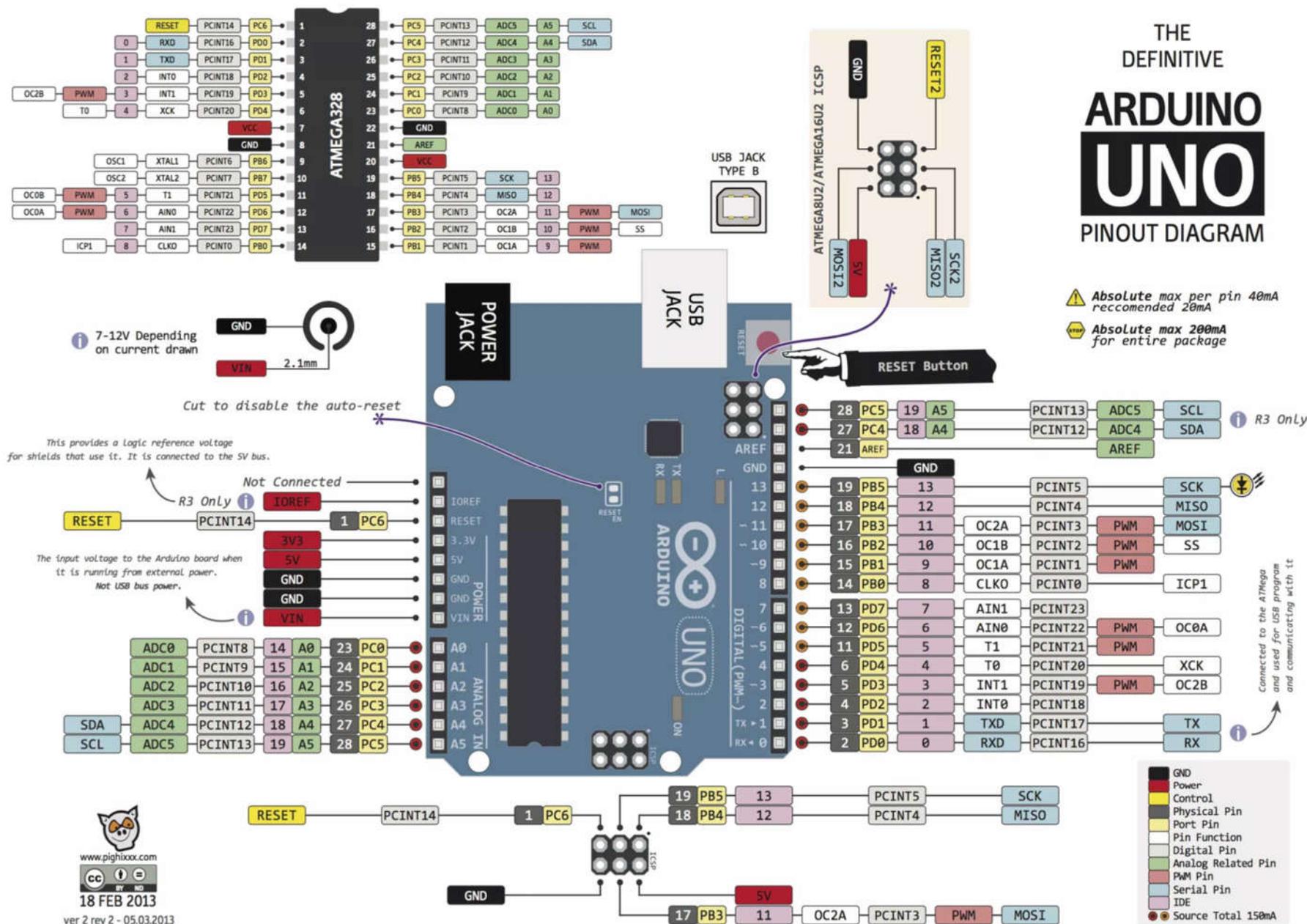


Figura 9-1 Desglose de pines de la placa Arduino UNO y el microcontrolador AtMega328 (pighixxx.com, 2013).

### 9.1.3. ESP32

La placa ESP32 es un SoC (system on chip) diseñado por Espressif, una compañía china. Integra un único chip, un procesador Tensilica Xtensa de doble núcleo de 32 bits a 160Mhz (con posibilidad de hasta 240Mhz), conectividad WiFi y Bluetooth. El ESP32 añade muchas funciones y mejoras respecto a otros SoC, como son mayor potencia, Bluetooth 4.0, encriptación por hardware, sensor de temperatura, sensor hall, sensor táctil, reloj de tiempo real (RTC), más puertos y más buses (Llamas, 2018).

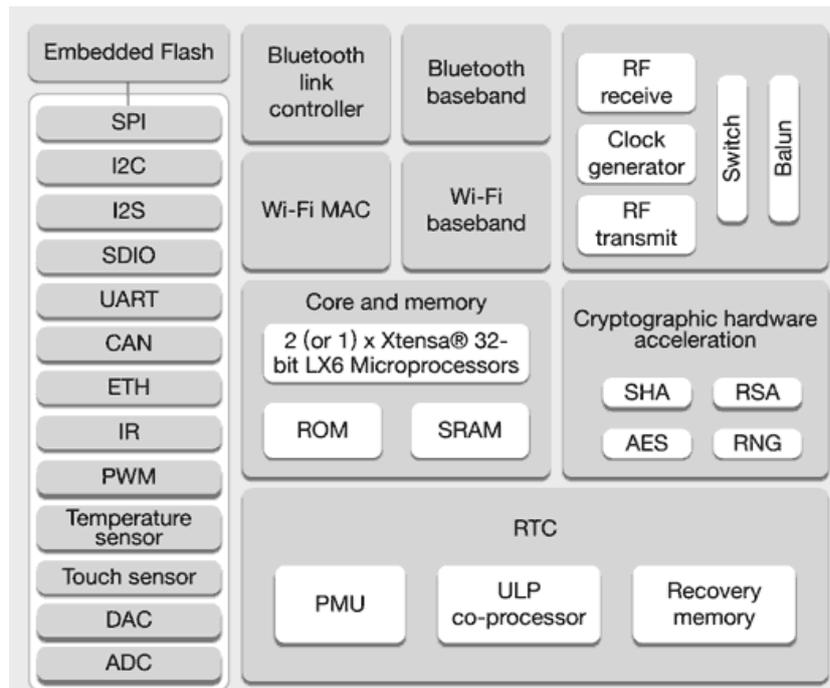


Figura 9-2 Diagrama de capacidades y características del SoC ESP32 (Llamas, 2018)

Se han desarrollado firmwares, documentación, herramientas y, aunque su soporte es aún escaso, en la actualidad es fácil encontrar tutoriales sobre el mismo y continuamente se publican nuevos artículos. En cuanto a lenguajes de programación tenemos varias opciones. Es posible emplear el IDE de Arduino, instalar MicroPython, RTOS, Mongoose OS, Espruino (Llamas, 2018).

Características del ESP32:

- Procesador Xtensa LX6 de 32 bits de doble núcleo
- Velocidad de 160Mhz (máximo 240 Mhz)
- Co-procesador de ultra baja energía
- Memoria 520 KiB SRAM
- Memoria flash externa hasta 16MiB
- Encriptación de la Flash
- Arranque seguro

- Pila de TCP/IP integrada
- Wifi 802.11 b/g/n 2.4GHz (soporta WFA/WPA/WPA2/WAPI)
- Bluetooth v4.2 BR/EDR y BLE
- Criptografía acelerada por hardware
- 32 pins GPIO
- Conversor analógico digital (ADC) de 12bits y 18 canales
- 2 conversores digital analógico (DAC) de 8bits
- 16 salidas PWM (LED PWM)
- 1 salida PWM para motores
- 11 conversor analógico a digital de 10 pin
- 10x sensores capacitivos (en GPIO)
- 3x UART, 4x SPI, 2x I2S, 2x I2C, CAN bus 2.0
- Controladora host SD/SDIO/CE-ATA/MMC/eMMC
- Controladora slave SDIO/SPI
- Sensor de temperatura
- Sensor de efecto Hall
- Generador de números aleatorios
- Reloj tiempo real (RTC)
- Controlador mando a distancia infrarrojos (8 canales)

El uso de este SoC está pensado exclusivamente por la necesidad de guardar datos en una memoria SD, en pruebas se comprobó que el ARDUINO UNO reducía sus capacidades de operación al programarlo para hacer todas las operaciones, por eso se optó por este chip. La figura 9-3 hace una descripción detallada de los pines del SoC. Esp32 en su versión DOIT DEVKIT V1.

## DOIT ESP32 DEVKIT V1 PINOUT



The image shows a DOIT ESP32 DEVKIT V1 board with various components and a detailed pinout table overlaid. The board features an ESP-WROOM-32 module, a USB-C port, a micro-USB port, and several push buttons. The pinout table is organized into columns for each side of the board, with a legend on the left and a secondary table on the right.

Pin	Function	Pin	Function
pin15	Chip-enable signal, Active High. EN	pin15	GPI023
pin14	ADC PA RTC_GPIO0 ADC1_CH0 SENSOR_VP GPI036	pin14	GPI022
pin13	ADC PA RTC_GPIO3 ADC1_CH3 SENSOR_VN GPI039	pin13	GPI01
pin12	RTC_GPIO4 ADC1_CH6 VDET1 GPI034	pin12	GPI03
pin11	RTC_GPIO5 ADC1_CH7 VDET2 GPI035	pin11	GPI021
pin10	XTAL_32kHz Touch9 RTC_GPIO9 ADC1_CH4 GPI032	pin10	GPI019
pin9	XTAL_32kHz Touch8 RTC_GPIO8 ADC1_CH5 GPI033	pin9	GPI018
pin8	DAC_1 RTC_GPIO6 ADC2_CH8 EMAC_RXD0 GPI025	pin8	GPI05
pin7	DAC_2 RTC_GPIO7 ADC2_CH9 EMAC_RXD1 GPI026	pin7	GPI017
pin6	Touch7 RTC_GPIO17 ADC2_CH7 EMAC_RX_DV GPI027	pin6	GPI016
pin5	Touch6 RTC_GPIO16 ADC2_CH6 EMAC_TXD2 GPI014	pin5	GPI04
pin4	Touch5 RTC_GPIO15 ADC2_CH5 EMAC_TXD3 GPI012	pin4	GPI02
pin3	Touch4 RTC_GPIO14 ADC2_CH4 EMAC_RX_ER GPI013	pin3	GPI015
pin2	GND	pin2	GND
pin1	VIN	pin1	VDD 3V3
pin5	HS2_CLK SD_CLK HSPI_CLK MTMS	pin5	HSPIHD SD_DATA1 HS2_DATA1
pin4	HS2_DATA2 SD_DATA2 HSPI_MISO MTDI	pin4	HSPIWP
pin3	HS2_DATA3 SD_DATA3 HSPI_MOSI MTCK	pin3	MTDO HSPI_CS0 SD_CMD HS2_CMD

**Legend:**

- POWER
- GND
- Serial Pin
- Analog Pin
- Control
- Physical Pin
- Port Pin
- Touch Pin
- DAC Pin

Figura 9-3 Desglose de pines de la placa DOIT DEVKIT V1 (playelek.com, 2016).

## 9.2. Componentes utilizados en el prototipo

Esta sección está diseñada para presentar de manera ordenada todos los componentes electrónicos y eléctricos que se utilizaron en la realización del prototipo. Sólo se presentarán aspectos relacionados al hardware, y sólo si es necesario un repaso de las características del software.

### 9.2.1. Módulo RTC (DS1307)

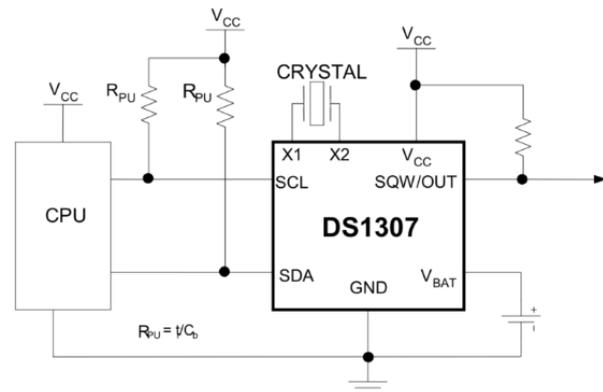
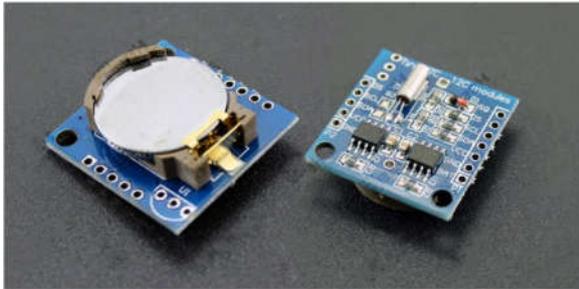


Figura 9-4 Módulo RTC DS1307, a la derecha se muestra una fotografía del módulo, a la derecha el circuito común de operación del módulo (Dallas Semiconductor, 2008).

#### Descripción general:

Es un circuito electrónico especializado cuya función es mantener la hora y fecha actual en un sistema informático (ya sea con microcontrolador u otro tipo de CPU). Se caracteriza por tener un bajo consumo de energía y también normalmente su propia fuente de alimentación auxiliar. Al recurrir a este tipo de circuitos integrados es de esperar que se obtenga una mejor precisión en la cuenta del tiempo. El DS1307 requiere dos fuentes de alimentación: Por una parte, requiere alimentación de 5 volts que opera mientras el circuito este encendido y funcionando y otra fuente de poder que proviene de una batería de litio (tipo reloj) que mantiene funcionando el reloj/calendario mientras la alimentación principal NO está disponible. El cambio entre ambas fuentes de alimentación es gestionado por el DS1307 de manera automática.

#### Características:

- Es un reloj en tiempo real. Cuenta segundos, minutos, horas, día, mes, semana y año. Compensa años bisiestos hasta el 2100.
- 56 bytes, respaldo de batería, RAM de uso general con escrituras limitadas.
- Interfaz I<sup>2</sup>C.
- Señal de salida de onda cuadrada programable.
- Circuito de conmutación y detección automática de falla de energía.
- Consume menos de 500nA con la batería de respaldo con el oscilador en funcionamiento
- Rangos de temperatura industrial -40°C a +85°C

### 9.2.2. Sensor de nivel de líquidos (FS-IR02)

El FS-IR02 es un sensor de nivel de líquido fotoeléctrico que funciona utilizando principios ópticos. Las ventajas principales de este modelo son una buena sensibilidad y no tener piezas mecánicas, lo que significa que la calibración es sencilla. La sonda resistente a la corrosión se monta fácilmente y puede manejar altas temperaturas y altas presiones. El sensor está equipado con un adaptador de interfaz para la compatibilidad con la interfaz Arduino.



Figura 9-5 Sensor de nivel FS-IR02

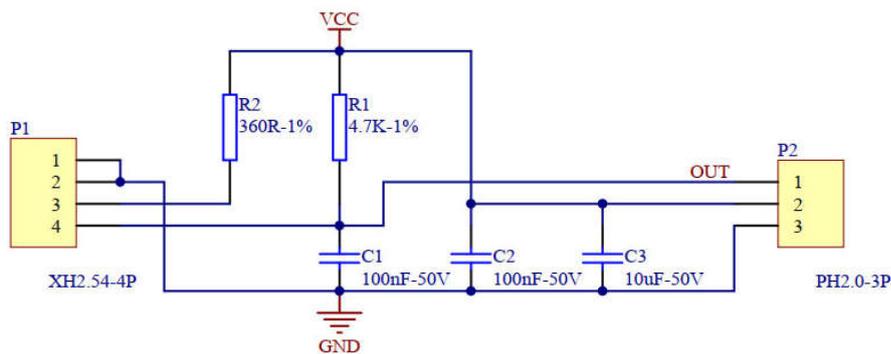


Figura 9-6 Circuito de la placa de conversión (conexión)

#### Especificaciones

- Modelo: FS-IR02
- Voltaje de entrada: 5V (DC)
- Corriente de salida: 12 mA
- Temperatura de operación: - 25 ~ 105 °C
- Voltaje (LOW) < 0.1V
- Voltaje (HIGH) > 4.6V
- Precisión de nivel del líquido:  $\pm 0.5$  mm
- Material: Policarbonato
- Rango de medición: Sin limite
- Vida útil : 50,000 Horas
- Dimensiones: 28 x 28 mm

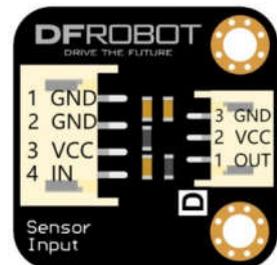


Figura 9-7 Placa de conversión del FS-IR02

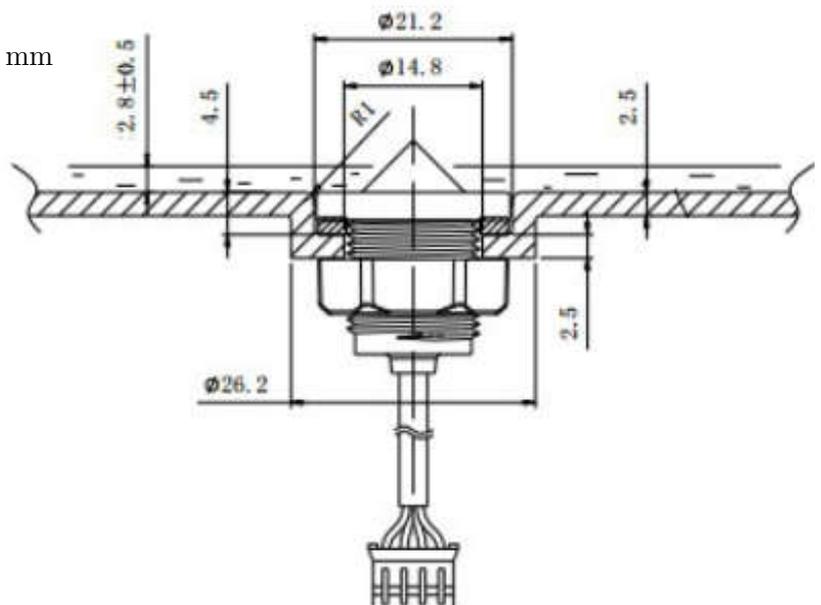


Figura 9-8 Medidas del sensor.

### 9.2.3. Electrodo industrial de pH (SKU: FIT0348)

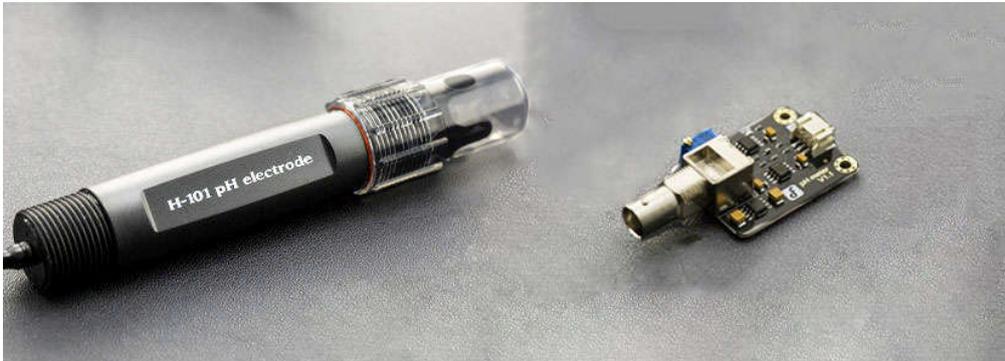


Figura 9-9 Fotografías del electrodo de pH FIT0348(derecha) y la placa de conversión (izquierda) (DFRobot, 2018c).

Este electrodo de pH está fabricado de una membrana de cristal sensitica con baja impedancia. Puede ser usado en una gran variedad de mediciones de pH con una respuesta rápida y estabilidad térmica. Tiene una buena reproductibilidad de los resultados, dificulta la hidrólisis y básicamente elimina los errores debidos al alkali. Trabaja en un rango de 0 a 14. El sensor puede ser usado en detecciones de largos periodos.

Especificaciones:

- Longitud (con la cubierta protectora): 17.7cm
- Diámetro : 2.74cm
- Longitud del cable : 5m
- Tipo de conexión : BNC
- Rango de mediciones : 0-14pH
- Precisión:  $\leq 0.02\text{pH}$
- Temperatura de funcionamiento: 0-60°C
- Tiempo de respuesta : 10s
- Desvío :  $\leq 0.02\text{PH}/24$  horas
- Resistencia de la membrana sensible:  $\leq 200 \cdot 10^6 \Omega$
- Punto equipotencial del electrodo:  $7 \pm 0.5\text{PH}$

Uso y mantenimiento:

- Para su calibración, se puede preparar una solución de pH conocido y confiable.
- La bola de vidrio del electrodo no debe estar en contacto directo con un objeto sólido. Así mismo cualquier grieta en el electrodo hará que las medidas sean poco fiables.
- Antes y después de las mediciones y limpie el electrodo con agua desionizada para mejorar la precisión de la medición.

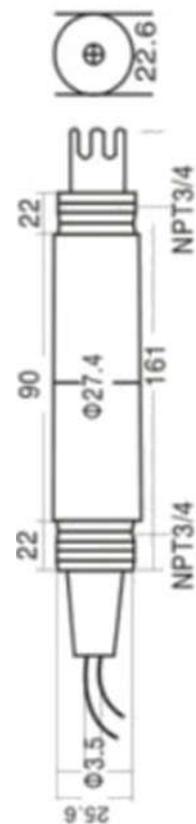


Figura 9-10 Medidas del electrodo.

- Con un uso constante puede producirse el fenómeno de pasivación lo que puede provocar una baja sensibilidad y respuestas tanto lentas como inexactas. Para limpiar el electrodo se recomienda sumergirlo en una solución a 0.1M de ácido clorhídrico.(HCl) por 24 horas. Enseguida haga el mismo tratamiento con una solución a 3M de cloruro de potasio (KCl) dejando remojar durante varias horas.
- El ciclo del electrodo es de aproximadamente un año, luego del envejecimiento se debe reemplazar rápidamente con electrodos nuevos.

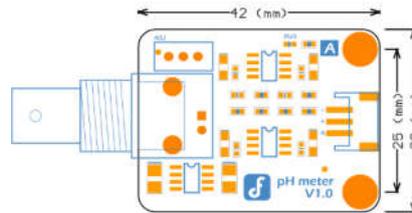


Figura 9-11 Placa de conversión/conexión (pHmeter V1.0) (DFRobot, 2018c)

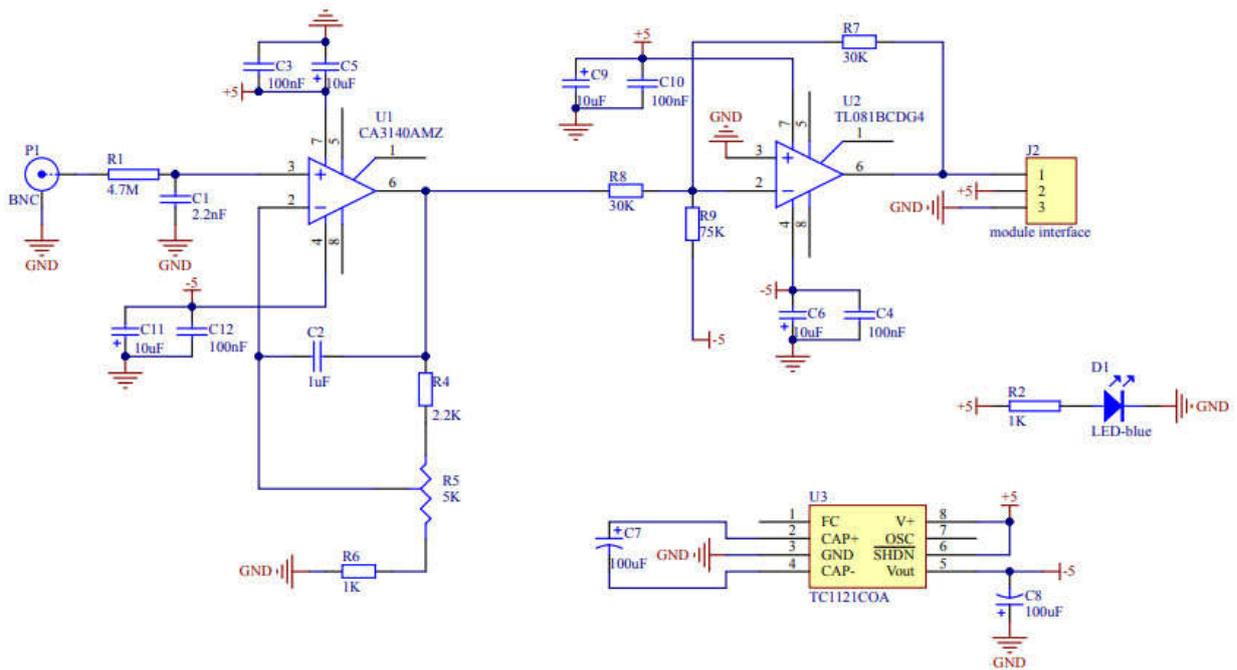


Figura 9-12 Circuito de la placa de conversión (DFRobot, 2018c)

### 9.2.4. Sensor de turbiedad SEN0189



Figura 9-13 Fotografías del sensor de turbiedad SEN189(derecha) y la placa de conversión (izquierda) (DFRobot, 2018d)

El sensor de turbidez de la marca Gravity detecta la calidad del agua por medio de mediciones de los niveles de turbiedad. Es un sensor fotoeléctrico con el que se detectan partículas suspendidas en el agua y se mide la velocidad de dispersión y la transmisión de luz que cambia a distintos niveles de sólidos suspendidos en el agua. Este sensor proporciona dos modos de salida: analógica y digital. El umbral es ajustable cuando se pone en el modo digital.

Especificaciones:

- Voltaje de operación: 5V DC
- Amperaje: 40mA (MAX)
- Tiempo de respuesta: <500ms
- Resistencia de aislamiento: 100M (Min)
- Método de salida: Analógica/ Digital
- Salida Analógica: 0 - 4.5V
- Salida Digital: Señal de encendido / apagado
- Temperatura de operación: 5°C~90 °C
- Peso: 30.0 g
- Dimensiones : 38 x 28 x 10 (mm)/1.5 x 1.1 x 0.4 (plg.)
- Proveedor: DFRobot

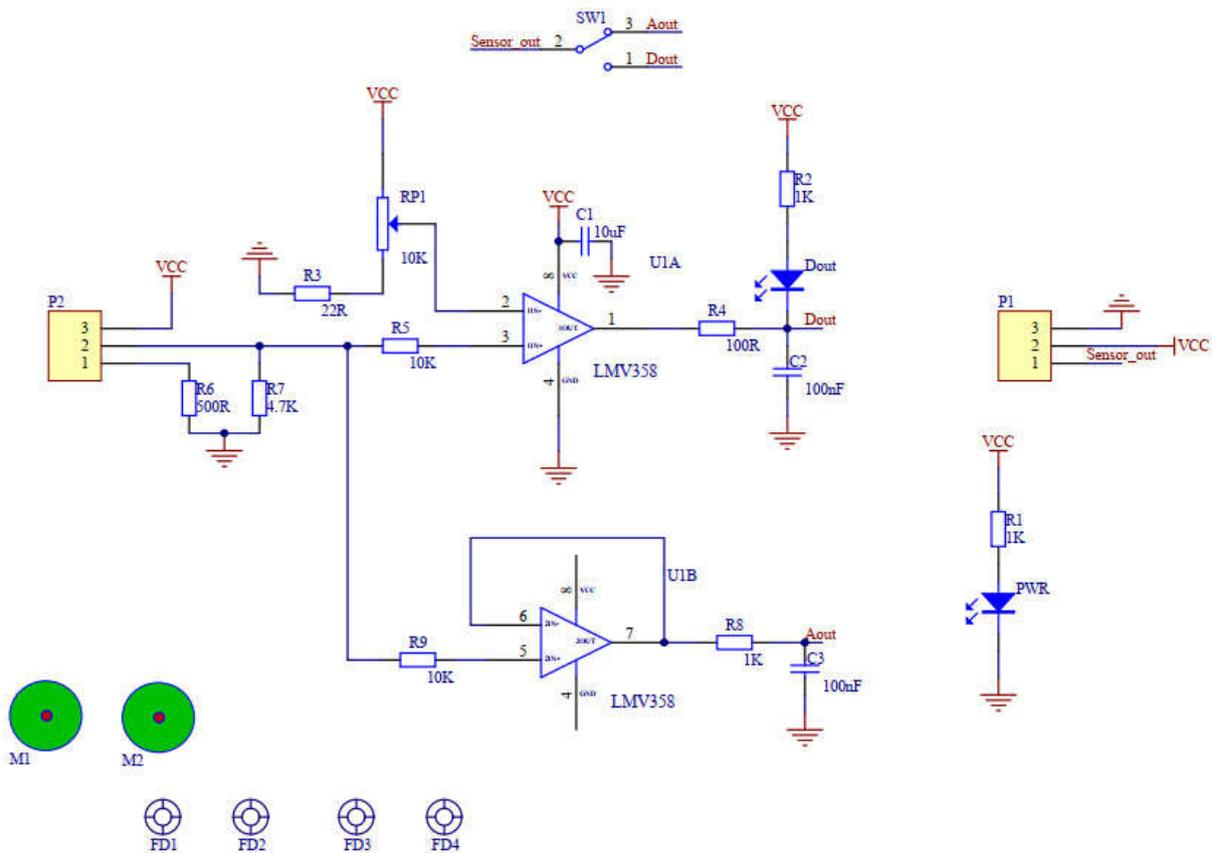


Figura 9-14 Circuito de la placa de conversión de la placa de turbidez (DFRobot, 2018d).

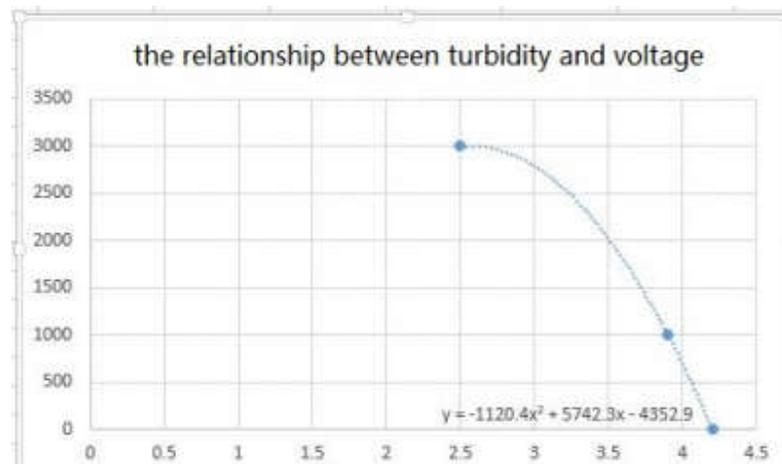


Figura 9-15 Relación entre la turbiedad y el voltaje (DFRobot, 2018d).

### 9.2.5. Sensor de temperatura (Dallas DS18B20).



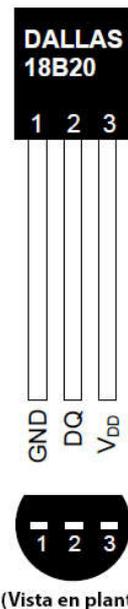
Figura 9-16 Fotografía del sensor de temperatura DS18B20 (derecha) y la placa de conversión (izquierda) (DFRobot, 2018e)

Este sensor de temperatura a prueba de agua usa el dispositivo DS18B20. La placa de conversión ya contiene las resistencias necesarias, así que es sencillo adaptarlo a la placa Arduino.

El DS18B20 provee una resolución de lectura de 9 a 12 bits configurables. Así mismo funciona sobre la interfaz 1-Wire y es compatible con sistemas de 3.0v a 5-5v.

#### Especificaciones

- Voltaje de operación: 3.0~ 5.5V.
- $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$  de resolución en el rango ( $-10^{\circ}\text{C}$  ,  $+85^{\circ}\text{C}$ ).
- Rango completo ( $-55^{\circ}\text{C}$ ,  $+125^{\circ}\text{C}$ ).
- Resolución ajustable de 9 a 12 bits.
- Usa la interface 1Wire para la comunicación digital con el microcontrolador.
- Identificación única de 64 bits grabadas en el chip.
- Sistema de alarma sobre el límite de temperatura.
- Tiempo de respuesta inferior a 750ms
- Interface de 3 cables:
  - Tipo A
  - Rojo -VCC
  - Negro – GND
- Amarillo -Datos
- Tubo de acero inoxidable de 6mm de diámetro.
- Longitud del cable de 90cm



(Vista en planta)

Figura 9-17 Esquema del DS18B20 (DFRobot, 2018e)

## 9.2.6. Relevador de 10A



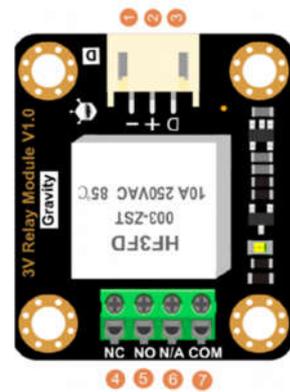
Figura 9-18 Fotografía del módulo del relevador de 10A (DFRobot, 2018f)

Este módulo no solo es compatible con las placas Arduino de 5 V, sino también con Raspberry Pi, BBB (BeagleBoard Black), mbed, Intel Joule, Arduino 101 y otros dispositivos de 3.3V. Está especialmente diseñado para dispositivos de bajo voltaje y funciona bien con fuentes de alimentación de 3.3V. El módulo dispone de una amplia gama de entradas de potencia.

Puede manejar hasta 10A de corriente y las piezas mecánicas están garantizadas hasta 100 millones de usos. Un indicador LED incorporado demuestra el estado del relé. Los terminales incluyen normalmente abierto (NO) y normalmente cerrado (NC).

### Especificaciones

- Voltaje de operación: 2.8V ~ 5.5V.
- Señal de entrada: Nivel alto ( $\geq 2.8V$ ); Nivel bajo ( $\leq 0.5V$ ).
- Corriente máxima: 10<sup>a</sup>.
- Voltaje máximo: 35VAC; 30VDC.
- Carga nominal: 10A @ 35VAC; 10A @ 28VDC.
- Potencia máxima: 300W.
- Tiempo de operación:  $\leq 10ms$ .
- Tiempo de liberación:  $\leq 5ms$ .
- Dimensiones: 38 x 33 x 20 mm.
- Vida de las piezas mecánicas 1 000 000 de usos.
- Vida eléctrica: 50 000 usos.
- Peso: 20 g



Número	Etiqueta	Descripción
1	-	GND
2	+	VCC
3	D	Señal de control
4	NC	Normalmente cerrado
5	NO	Normalmente abierto
6	N/A	Terminal vacía
7	COM	Puerto común

Figura 9-19 Esquema de conexiones del módulo de relevador (DFRobot, 2018f)

### 9.2.7. Módulo MH-SD

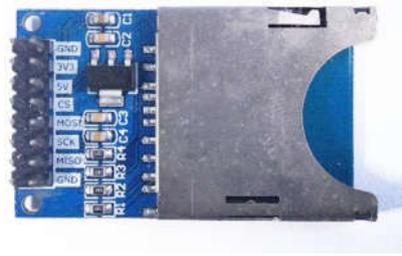


Figura 9-20 Fotografía del módulo MH-SD.

Este módulo se usa para transferir datos desde y hasta una memoria estándar SD. Los pines de salida son directamente compatibles con Arduino. También pueden usarse otros microcontroladores. Nos permite adherir almacenamiento masivo y datos de ingreso a nuestros proyectos.

#### Características

- Voltaje de entrada: 3.3V/5V
- Pines SD SPI de salida: MOSI, SCK, MISO y CS
- Comunicación con la interfaz SPI.

### 9.2.8. Convertidor lógico bidireccional.



Figura 9-21 Fotografía del convertidor lógico (izquierda) y diagrama electrónico del mismo (derecha) (Sparkfun, 2018c)

El Convertidor de Niveles Lógicos Bidireccional es un pequeño dispositivo que baja de manera segura las señales de 5V a 3.3V y también sube de señales de 3.3V a 5V al mismo tiempo.

Cada convertidor de nivel tiene la capacidad de convertir 4 pines en la parte alta a 4 pines en la parte baja con dos entradas y dos salidas previstas para cada lado.

El convertidor de nivel es fácil de usar. La tarjeta tiene que ser alimentada con dos fuentes de voltaje (voltaje alto y voltaje bajo) que el sistema está utilizando. Voltaje Alto (5V por ejemplo) al pin 'HV', Voltaje Bajo (3.3V por ejemplo) a 'LV' y tierra del sistema al pin 'GND'. Se debe tener en cuenta que el convertidor es puramente digital; no puede convertir señales análogas.

Dimensiones: 0.63 x 0.52" (16.05 x 13.33mm)

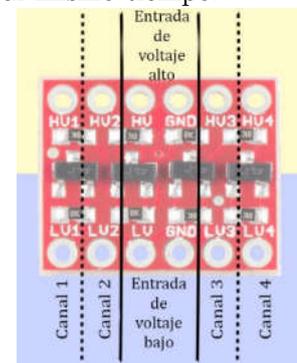


Figura 9-22 Esquema de conexión del convertidor lógico bidireccional (Sparkfun, 2018c)

### 9.2.9. Válvula de bola motorizada (USS-MSV00017)

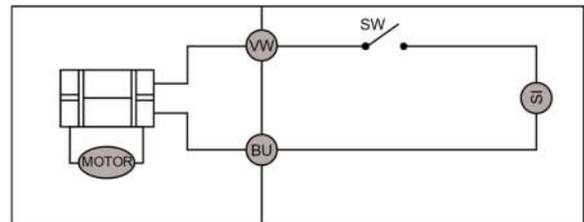


Figura 9-23 Fotografías de la Valvula USS-MSV00017 (U.S. Solid, 2018)

Las válvulas de bola motorizadas son piezas fundamentales en el control de numerosos sistemas. Este modelo permanece en la posición deseada (abierta) sin gastar casi nada de energía, usándola sólo cuando se cambia de posición. Esta es una gran diferencia respecto a las válvulas solenoides; pues la mayoría de los solenoides se activan continuamente cuando están en una nueva posición.

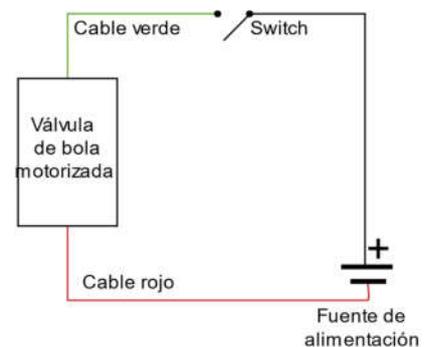
El modelo elegido tiene la particularidad de cerrarse automáticamente ante la pérdida de energía, por lo tanto, es una válvula normalmente cerrada.

Así mismo, este modelo puede pedirse para que sea normalmente abierta. Su funcionamiento es tan sencillo como utilizar un apagador.



Especificaciones:

- Marca: U.S. SOLID
- Modelo: USS-MSV00017
- Material de la válvula: Latón
- Asiento de la bola: PTFE (teflón)
- Sello: EPDM (Caucho)
- Tiempo de funcionamiento: 3-5 segundos
- Voltaje de operación: 9-24V AC / DC
- Potencia máx .: 2 W
- Torque máximo: 2 Nm
- Presión máxima: 1.0 Mpa
- Rango de temperatura del fluido: 0 ° C a 90 ° C
- Rango de temperatura ambiente: -10 ° C a 40 ° C
- Grado de protección IP: IP65
- Esperanza de vida: 80,000 a 100,000 ciclos
- Diámetro: Estándar 3/4"
- Tipo de rosca: NPT (americana cilíndrica para tubos)
- Tipo de cableado: retorno automático de 2 cables



### 9.3. Diagramas electrónicos

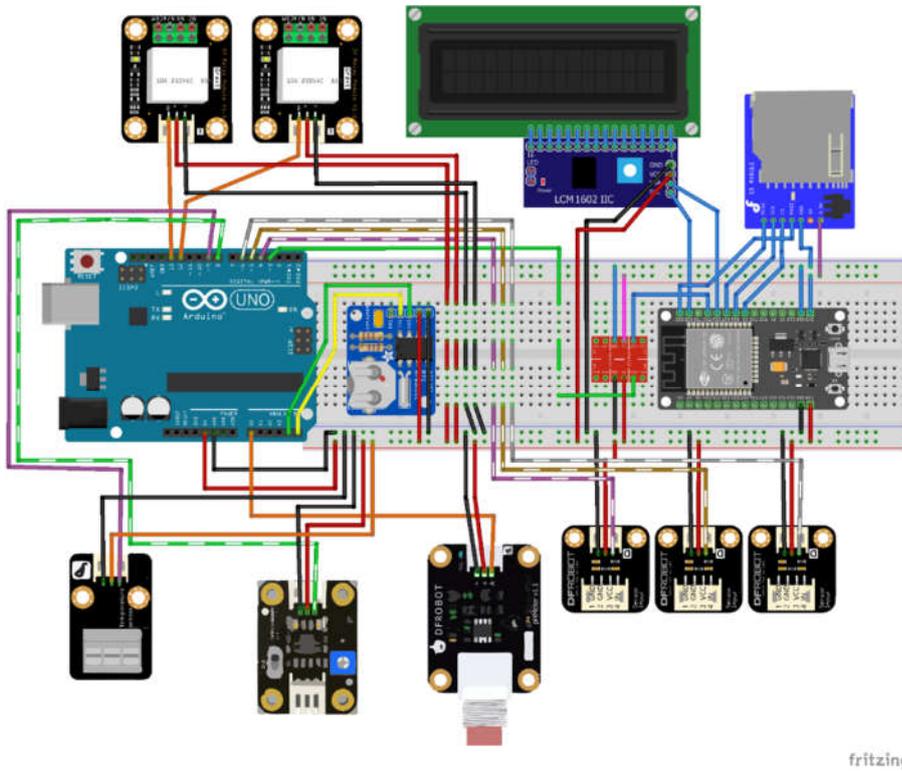


Figura 9-24 Esquema de conexiones de los componentes electrónicos

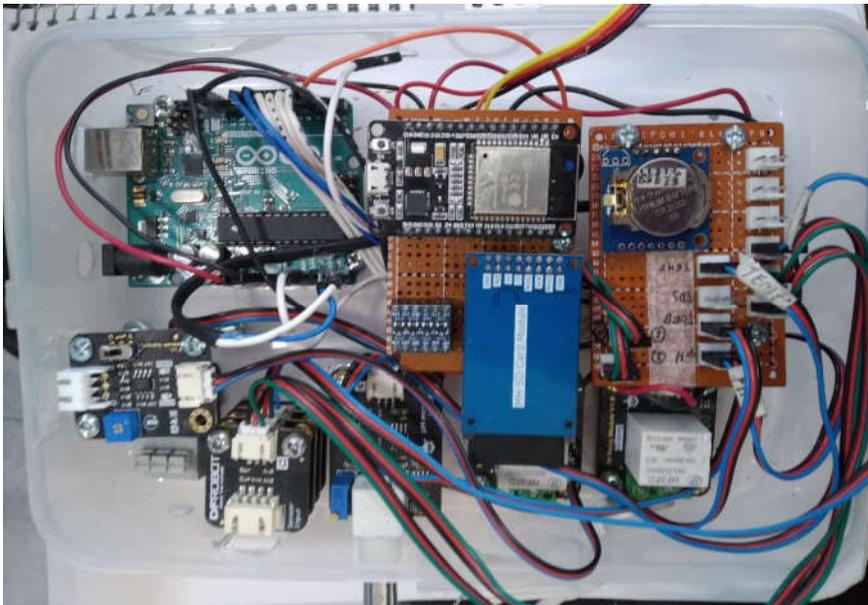


Figura 9-25 Fotografía de las conexiones

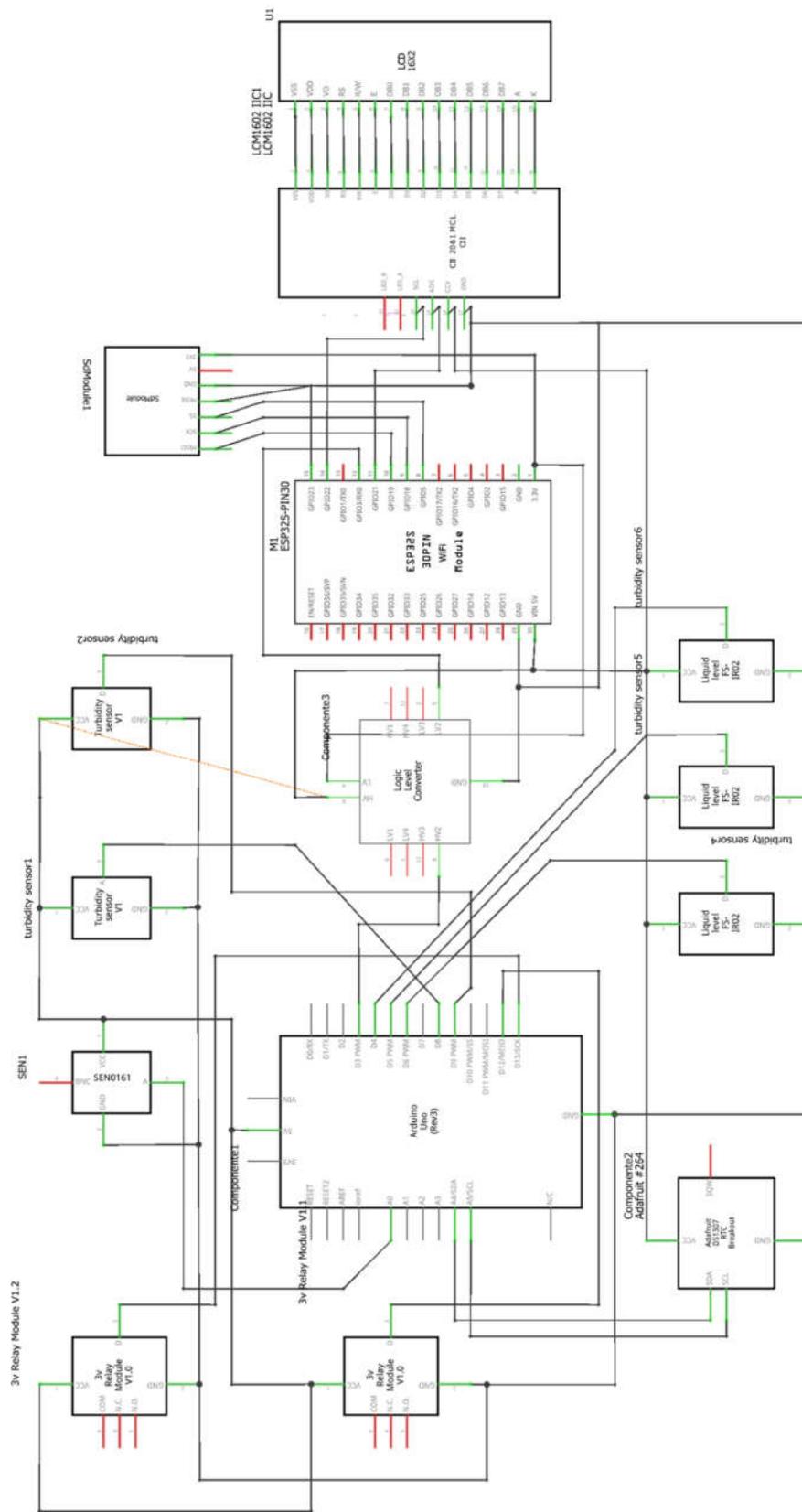


Figura 9-26 Diagrama esquemático de los componentes y sus conexiones

### 9.4. Parte lógica del separador (software)

Para el funcionamiento lógico del dispositivo se ideó un diagrama de flujo que nos ayudase a conseguir los objetivos a partir de este diagrama de flujo se programaron los dos microcontroladores y se comunicaron entre sí. El detalle del código que se utilizó en cada uno está en la sección 12.2 y 12.3 de Anexos

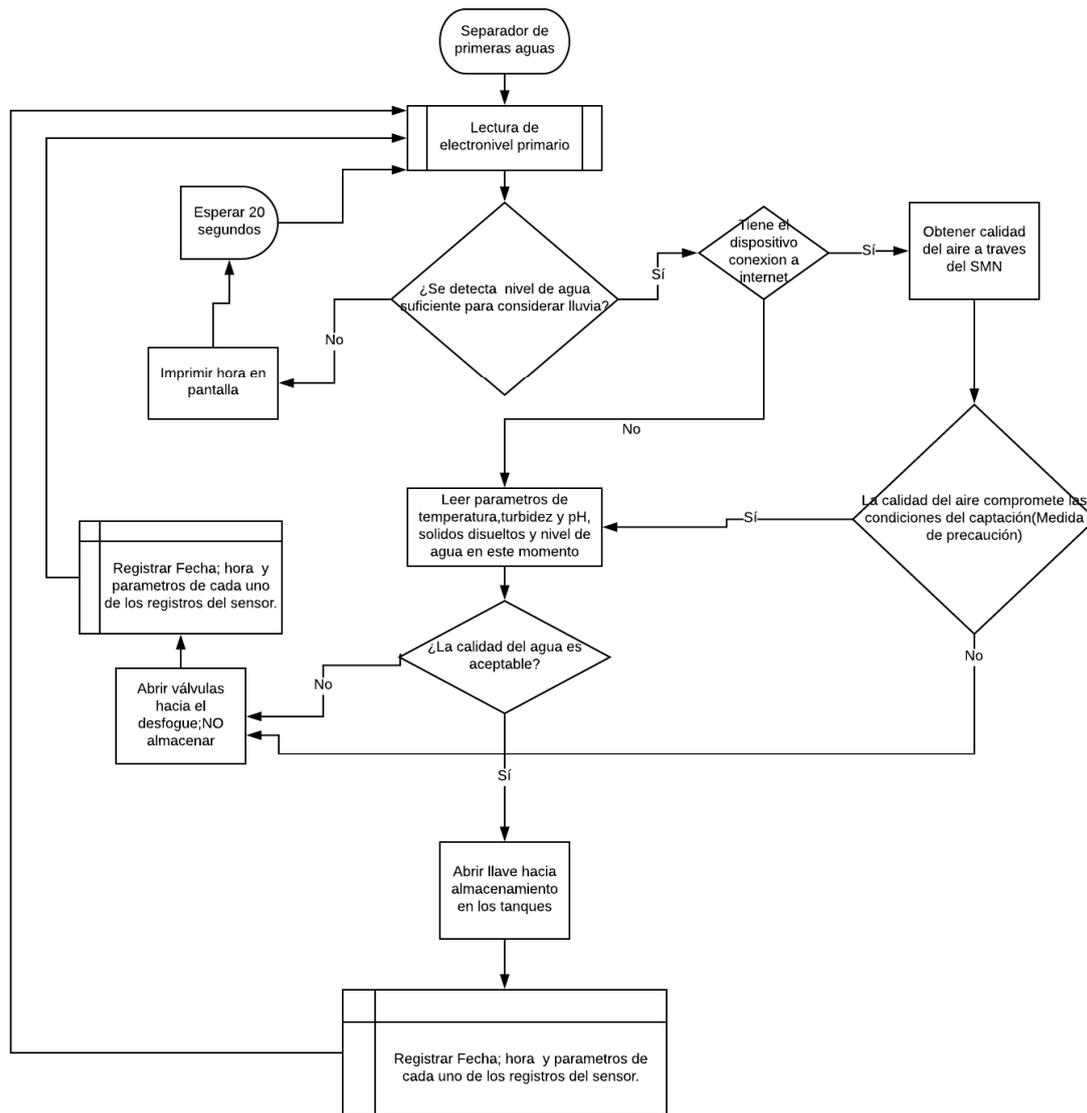


Figura 9-27 Diagrama de flujo del funcionamiento del DISPLU.

# 10 Manufactura e instalación

---

*“El agua no debe ser juzgada por su historia, sino por su calidad.”*

*Lucas Van Vuuren*

La primera parte de esta etapa comienza con el diseño de los cortes en acrílico. El diseño del dispositivo se hizo en la primera etapa así que la justificación del diseño de este mismo se tomó como referencia los planos desarrollados en la etapa anterior. Para ello se hizo el desglose de las piezas y se acomodaron de tal forma que el espacio en la lámina se aprovechara de la mejor forma; en este caso, todo se ajustó perfectamente a una lámina de 240 cm x 120 cm. El acomodo fue el que se muestra en la figura 10-1

Los colores en este dibujo son importantes; pues en con base en ellos que la cortadora CNC se guía para saber dónde cortar y qué cortar primero; así como solo grabar superficialmente; paea ello se utilizó la guía de colores específica de la empresa

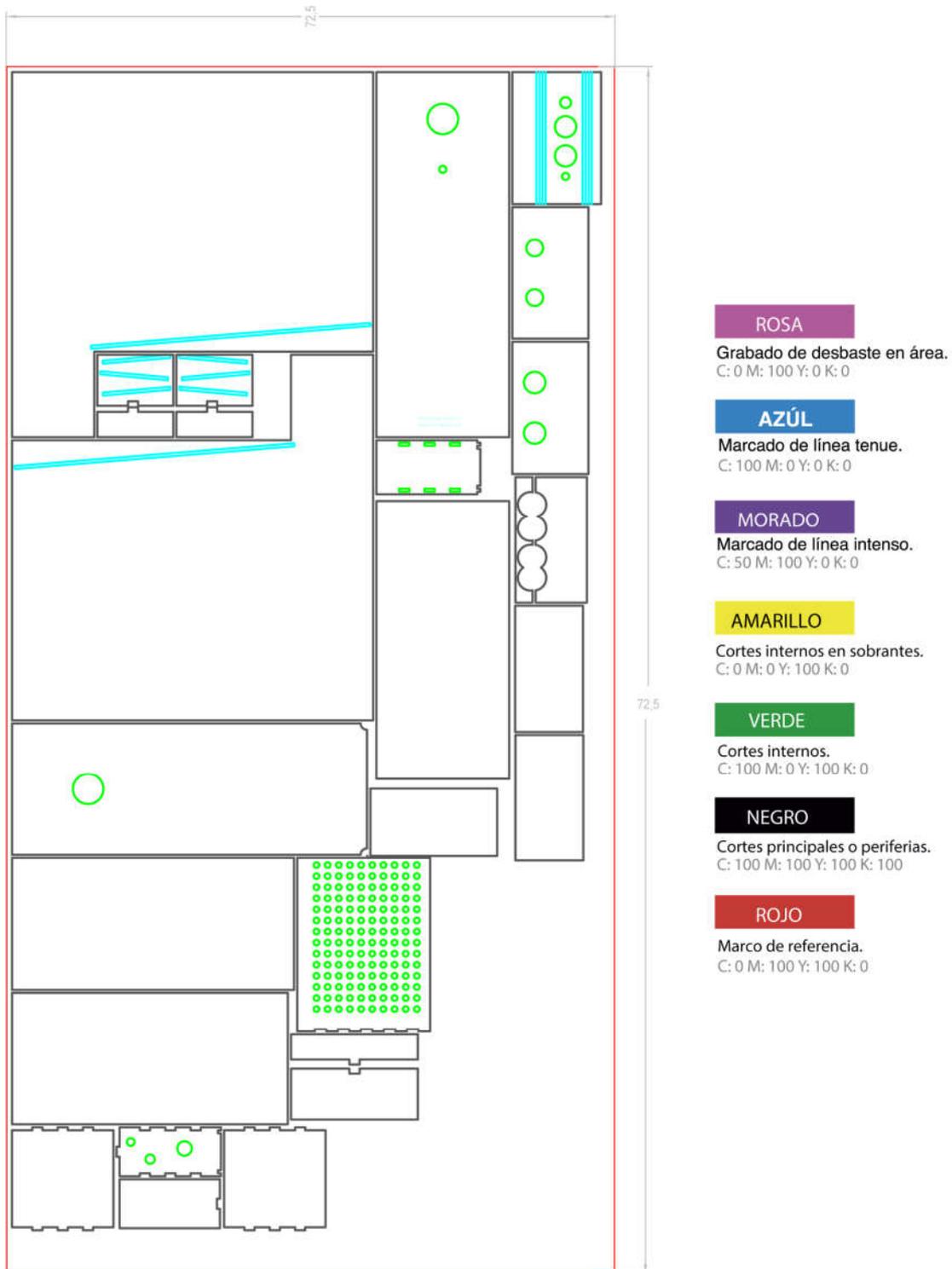


Figura 10-1 Hoja de acrílico y sus respectivos cortes

FIGURA D.2 CÓDIGO DE COLORES QUE UTILIZAN LAS MÁQUINAS DE CORTE LÁSER CNC.

### 10.1. Reserva fotográfica del proceso de construcción.

Siendo así, la lámina de acrílico se mandó a cortar en láser por la empresa “Corte láser Fénix”. La idea de cortar en láser este material, es que el riesgo de fugas debido a un mal corte se redujera al máximo; la precisión de una máquina nos garantizaría que los cortes rectos no tuviesen imperfecciones a lo largo del perímetro; y en consecuencia el pegado de las piezas entre sí sería más fácil y menos riesgoso.

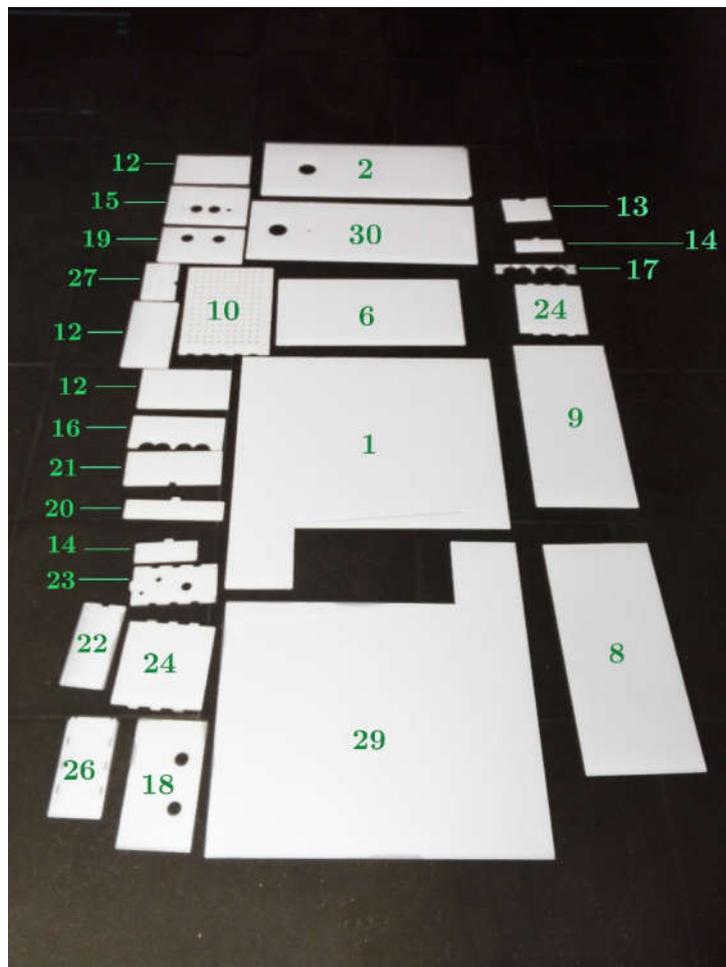


Figura 10-2 Fotografía de las piezas cortadas. En verde su nomenclatura basada en el plano 2/32

Teniendo las piezas, y gracias al apoyo de los talleres de diseño industrial, tuvimos un lugar apropiado para trabajar con el acrílico. El proceso para unir las piezas fue a través del cemento acrílico WELD-ON 4; este cementante acrílico, es capaz de “fundir” las piezas sólidas de acrílico

con las que entra en contacto; gracias a esta propiedad, es posible fundir la superficie de dos distintas piezas y al unir las, estas quedaran fuertemente adheridas entre sí. El proceso es redundante; pero se describen algunos pasos en la siguiente sección. Las primeras piezas que se pegaron fueron las de la figura 9-3

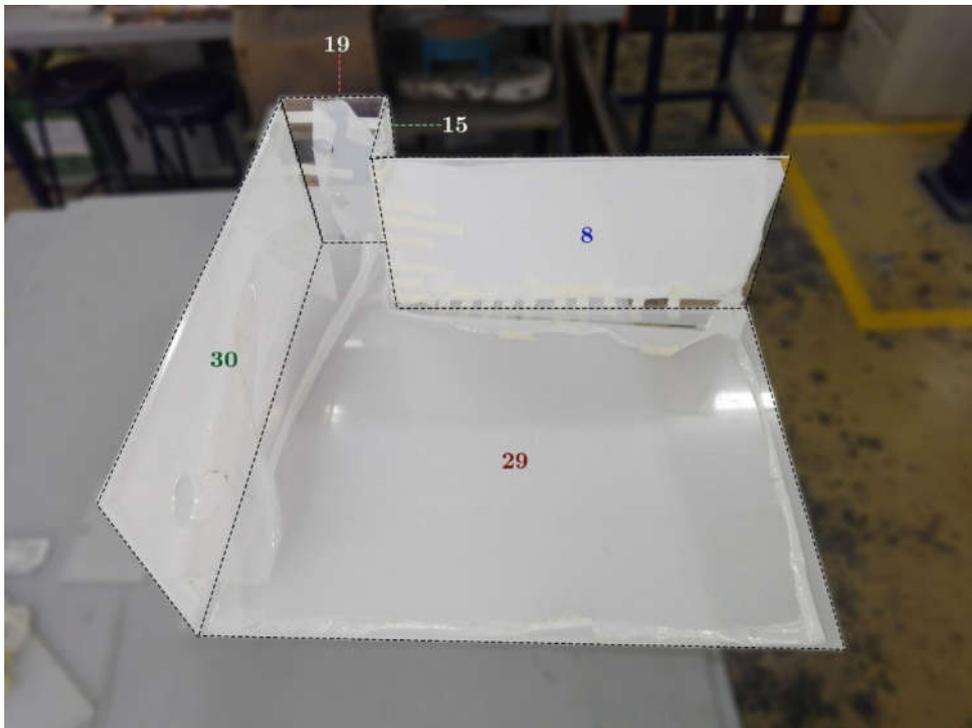


Figura 10-4 proceso constructivo: las láminas cortadas de acrílico se cementaron por partes; dejando unos diez minutos para el fraguado del pegamento; después de este periodo la unión es lo suficientemente rígida como para soportar su manipulación

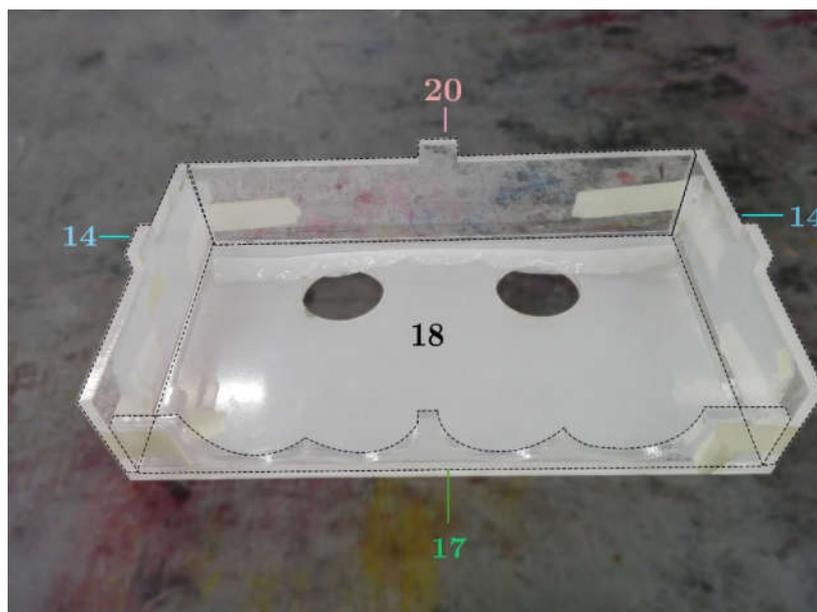


Figura 10-3 Piezas 14,17,18 y 20 ensambladas

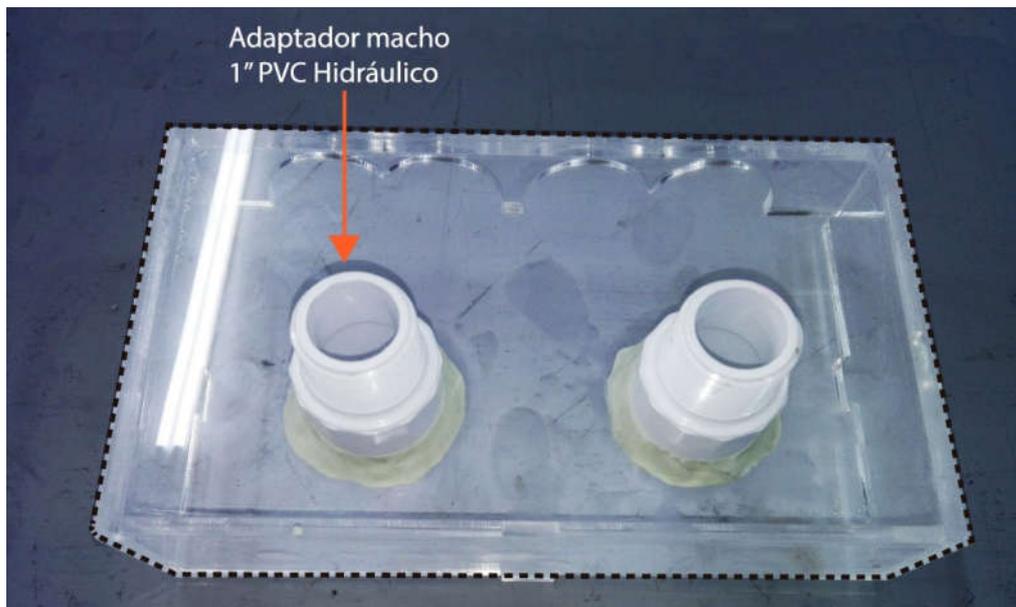


Figura 10-6 Ensamble de los adaptadores Macho de 1" a las piezas de acrílico

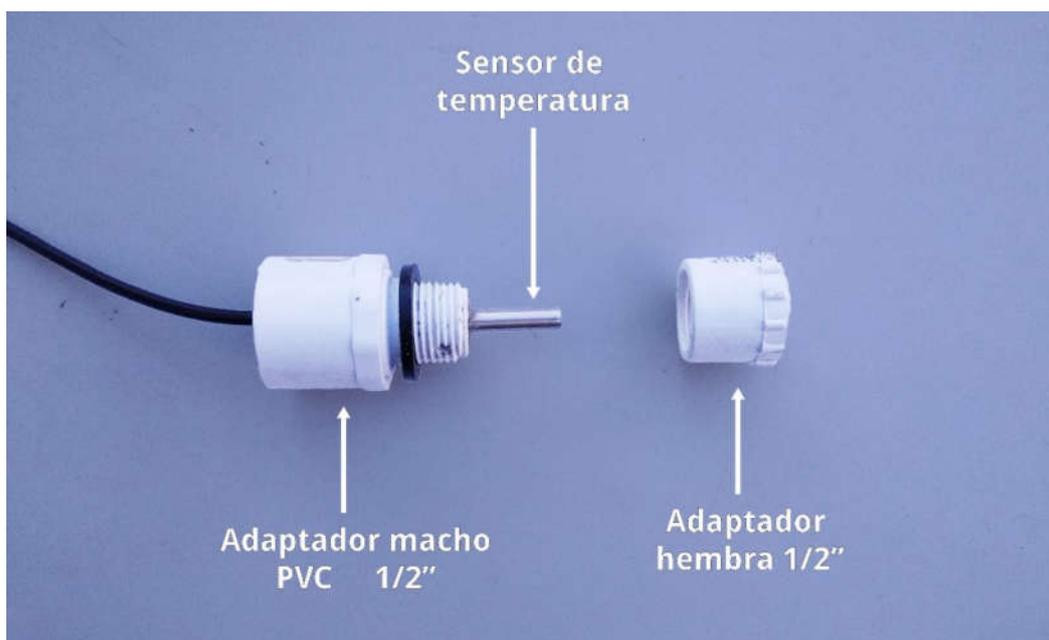


Figura 10-5 Sensor de temperatura adaptado

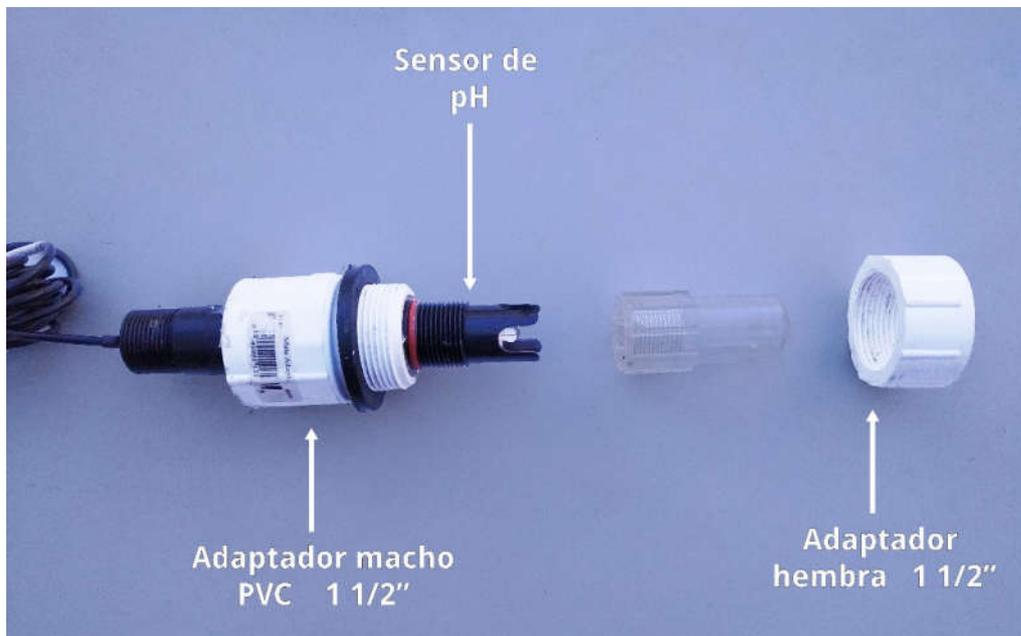


Figura 10-7 Sensor de pH adaptado

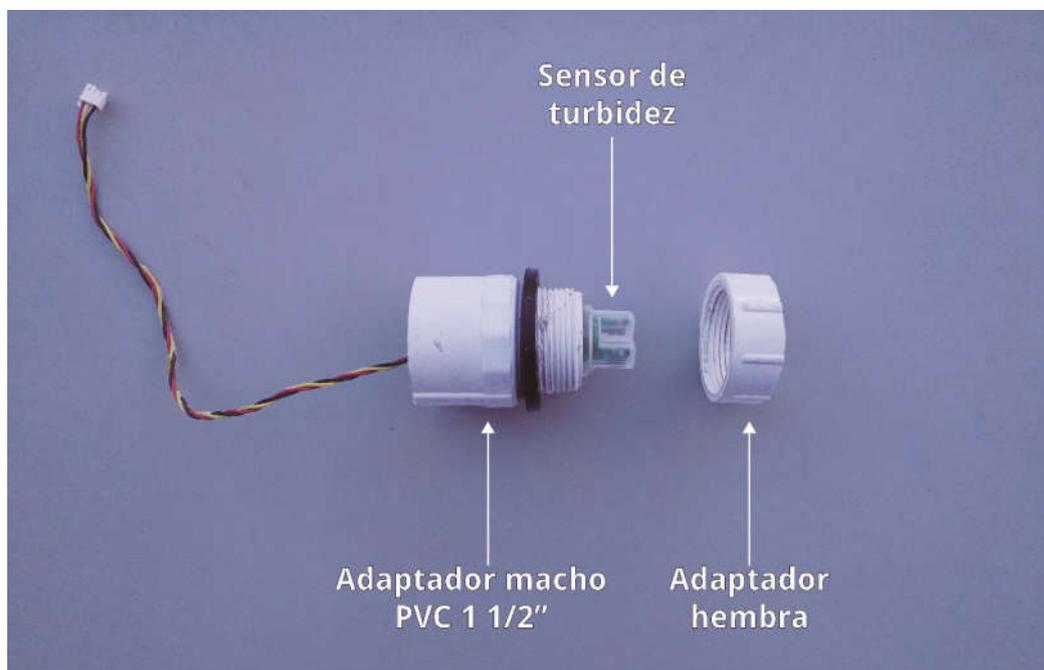


Figura 10-8 Sensor de Turbidez adaptado



Figura 10-9 Vista del Displu ensamblado

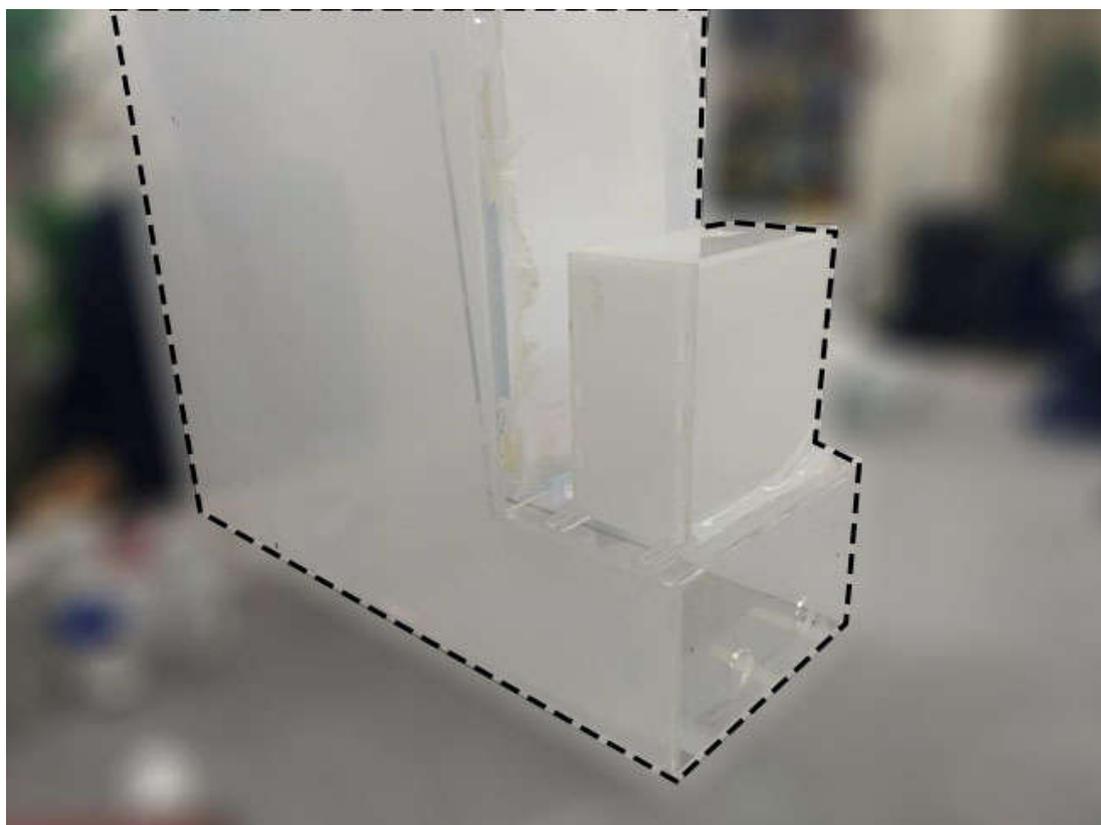
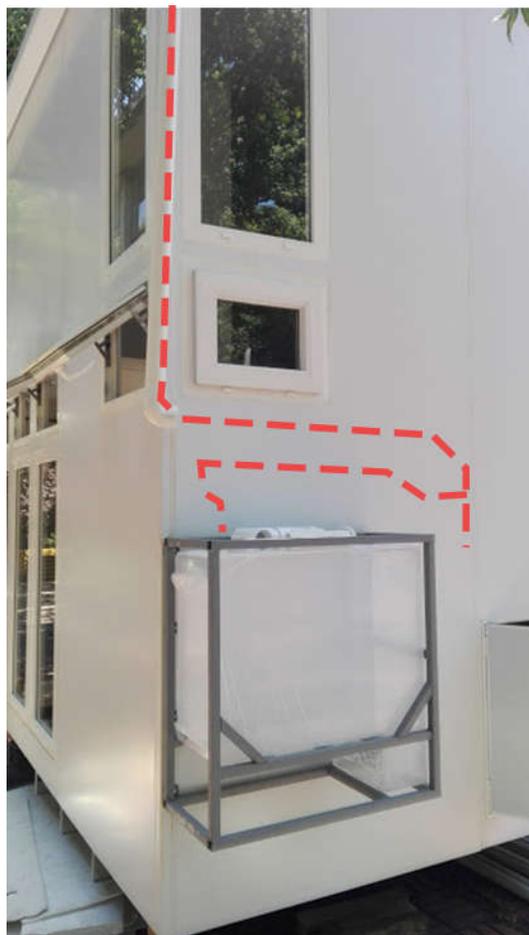


Figura 10-10 Vista del DISPLU ensamblado



**Figura 10-11** Esquema de la trampa de arenas

La bajada de agua pluvial se diseñó con vistas en el posible ingreso de sólidos de tamaño considerable. Es por ello que se instaló una trampa de arenas antes del dispositivo separador de primeras aguas.



**Figura 10-12 DISPLU instalado**

Una vez que todas las piezas estuvieron pegadas; y días después para dejar que el cementante alcance una rigidez importante, se hicieron pruebas para notar si había algún defecto (dígase fuga) en su fabricación. Las pocas fugas que se presentaron se repararon con silicona.

# 11 Conclusiones

Buscar nuevas fuentes de agua no es nuevo; se ha pensado y trabajado mucho en el tema y todas las fuentes están debidamente consideradas en el ámbito académico. En este aspecto no hay nada innovador, pues desde que se conoce el ciclo completo de agua todas las opciones han sido analizadas. Es, sin embargo, un reto actual hacer eficientes las distintas fuentes de agua que no lo son. Este reto se nos impone por una necesidad latente en tanto que las ciudades son cada vez más demandantes de recursos y hay más metrópolis en el mundo.

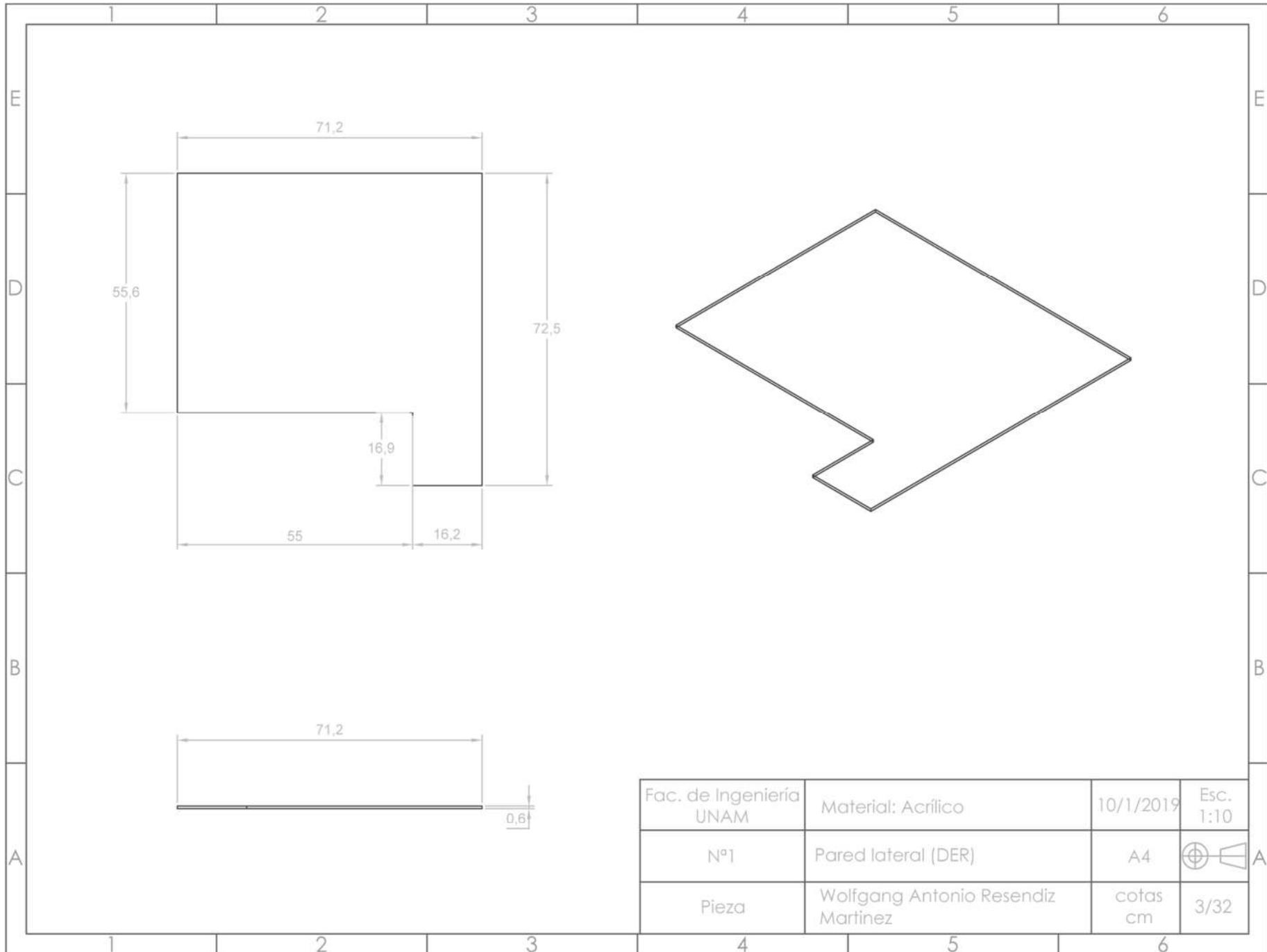
Este trabajo es otra referencia al intento de mejorar en eficiencia los procesos de obtención de agua para consumo humano, en este caso el de agua de lluvia y obedece a la línea de investigación sobre captación de agua pluvial que la Facultad de Ingeniería de la UNAM, en su departamento de Ingeniería Sanitaria y Ambiental está desarrollando. También es un intento por abrir la discusión hacia la diversificación de las fuentes de agua en la Ciudad de México; que como se demostró en el capítulo 4 guarda un enorme potencial hídrico en la recolección de sus lluvias. Llegando a ayudar en un 10% el ahorro de agua en el proyecto VIS-CASA, o hasta 25% en condiciones de vivienda más generales. De ser prioridad en el sector gubernamental o en el privado, puede ser una alternativa masiva para mitigar la sobreexplotación de las fuentes comunes en la ciudad.

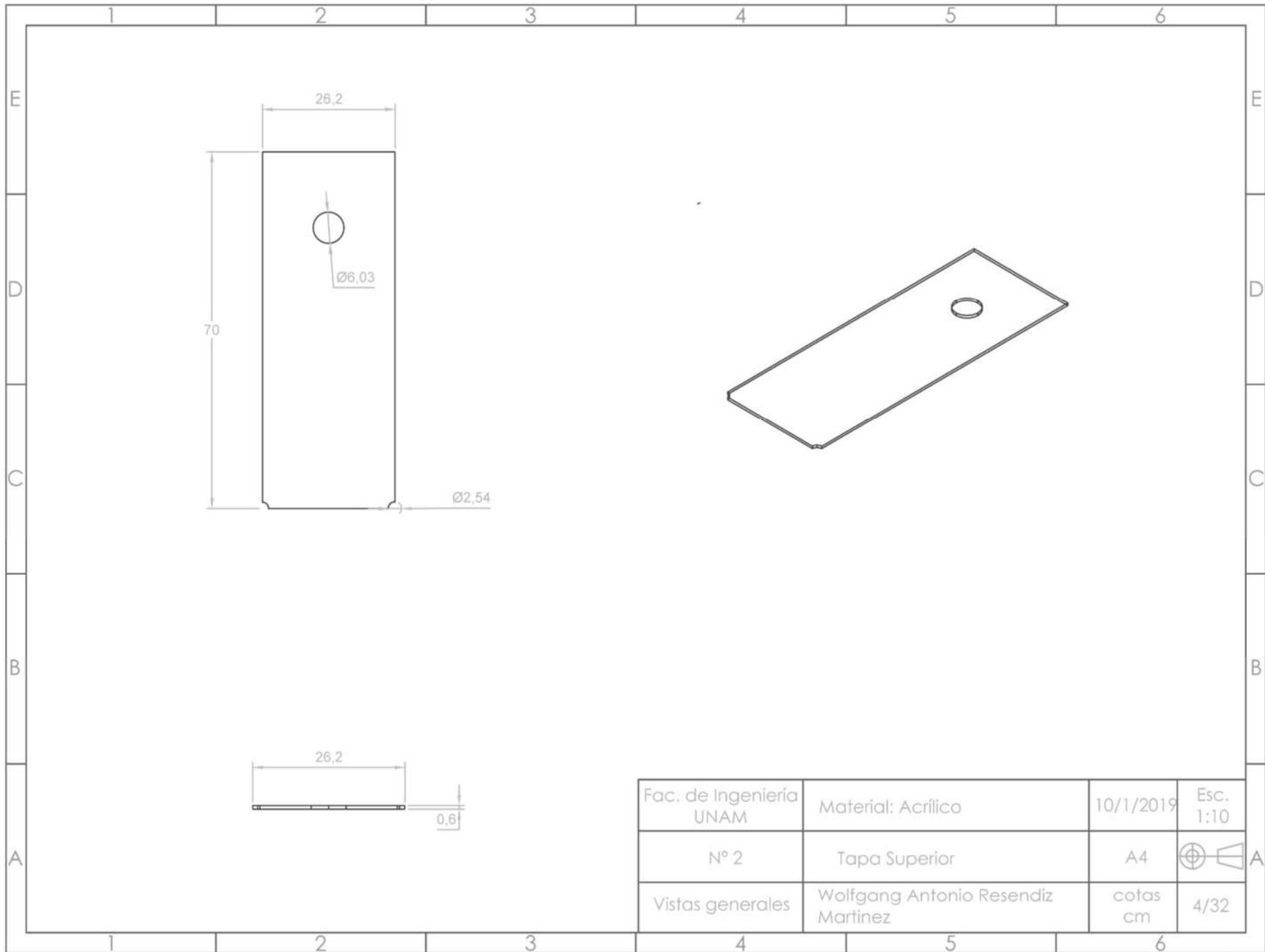
Con la observación de los sistemas de captación de agua de lluvia se pudo identificar un área de oportunidad que no se había explorado hasta ahora, y que va acorde a los tiempos actuales, en donde la inteligencia artificial, el IOT y la electrónica son cada vez más accesibles. Se observó entonces que la separación de las primeras aguas de lluvia, con el fin de mejorar la calidad de agua almacenada, puede abordarse desde la automatización, mejorando nuestra comprensión del fenómeno y haciendo más eficiente el proceso. Con este dispositivo puede controlarse de manera precisa las condiciones de entrada del agua captada, separando en tiempo real con base en la calidad del agua entrante.

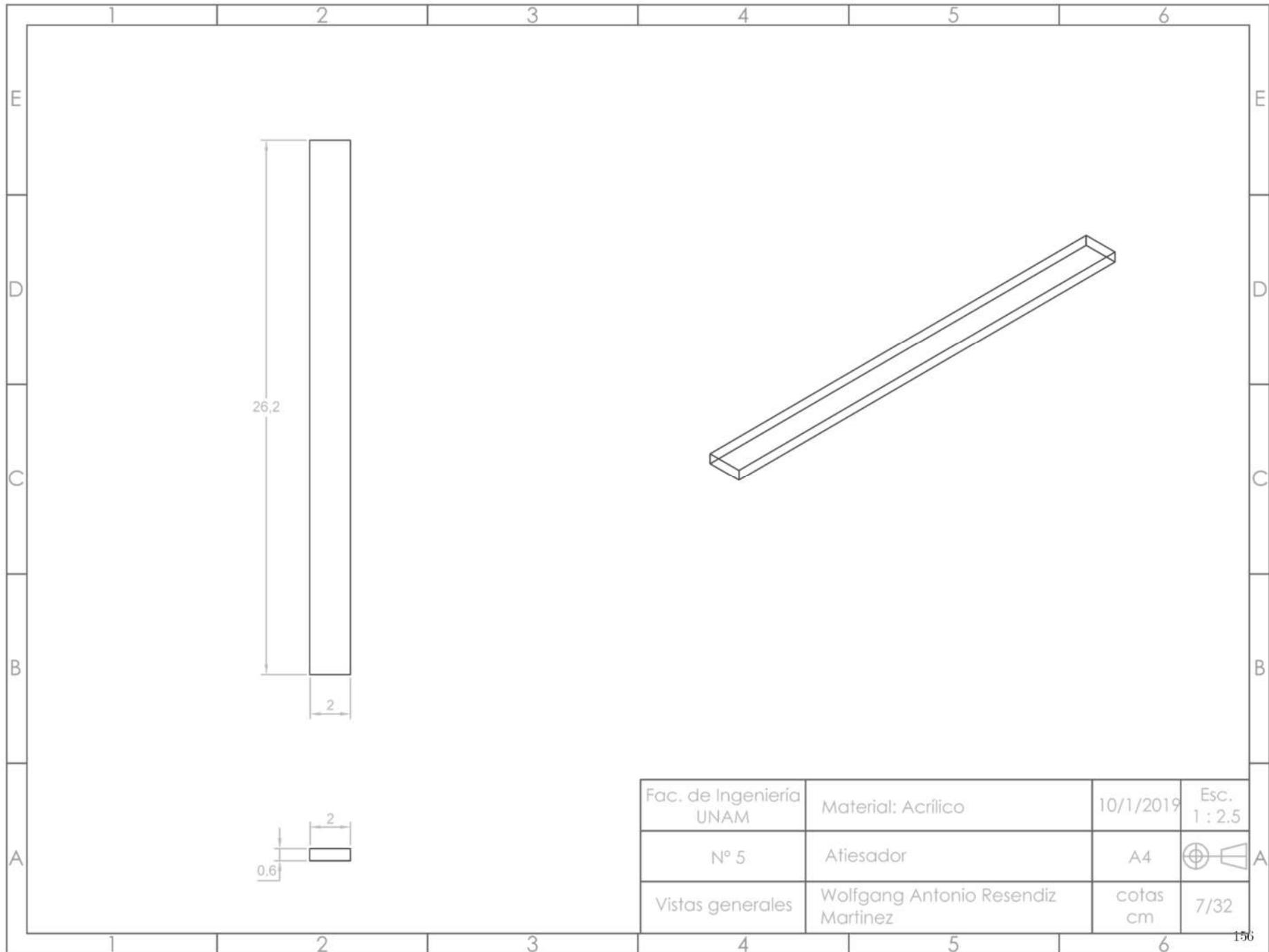
Así mismo, este trabajo sienta la base a futuras investigaciones sobre la forma más eficiente de abordar el fenómeno de primeras aguas de lluvia y su automatización, pues se puede modificar fácilmente para explorar y analizar variaciones en la lógica de funcionamiento del DISPLU, ya sea separando por calidad, por tiempos de sequía, comparando los valores de la calidad del aire o una combinación de estas posibilidades.

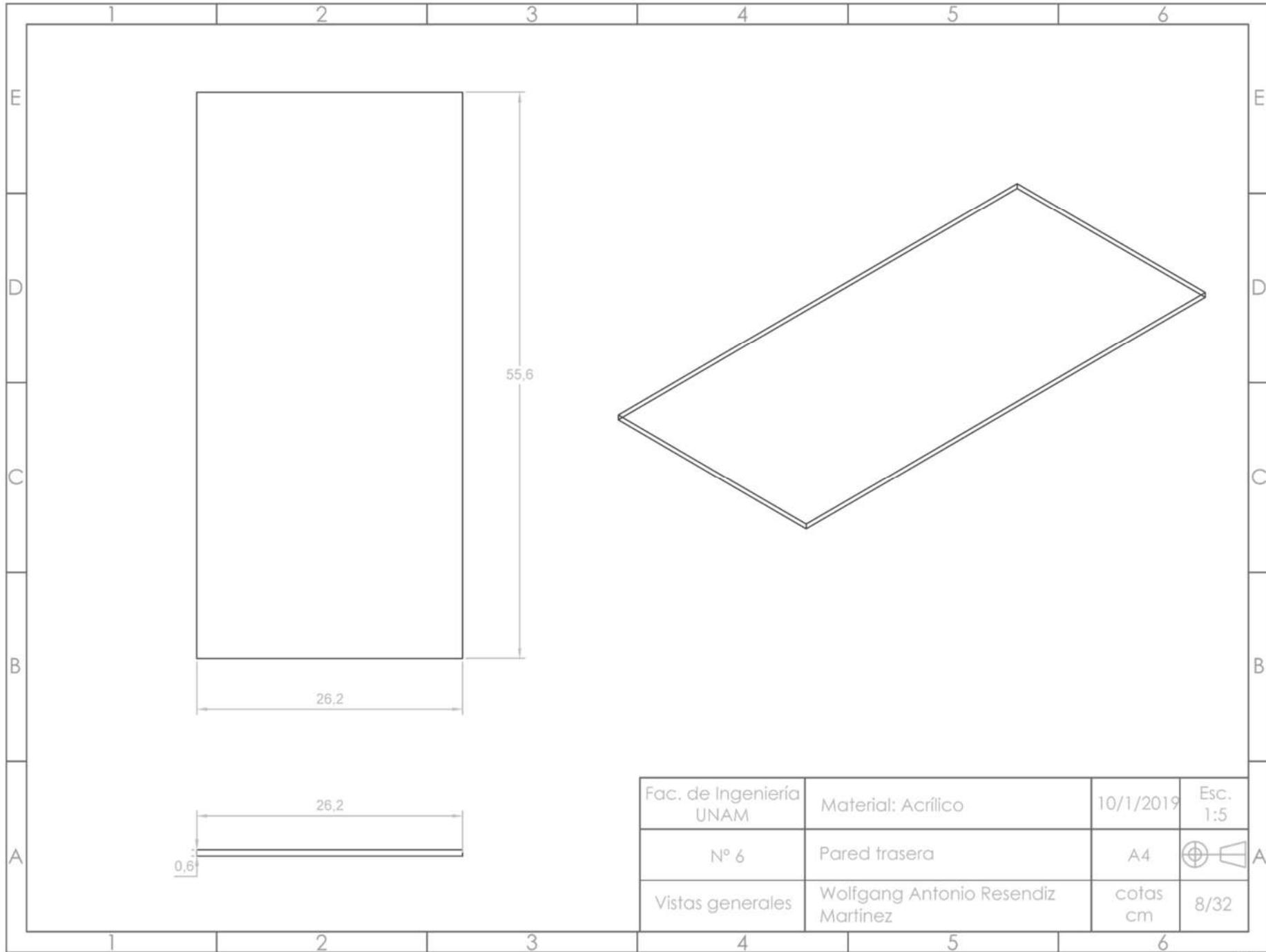
# **12** Anexos

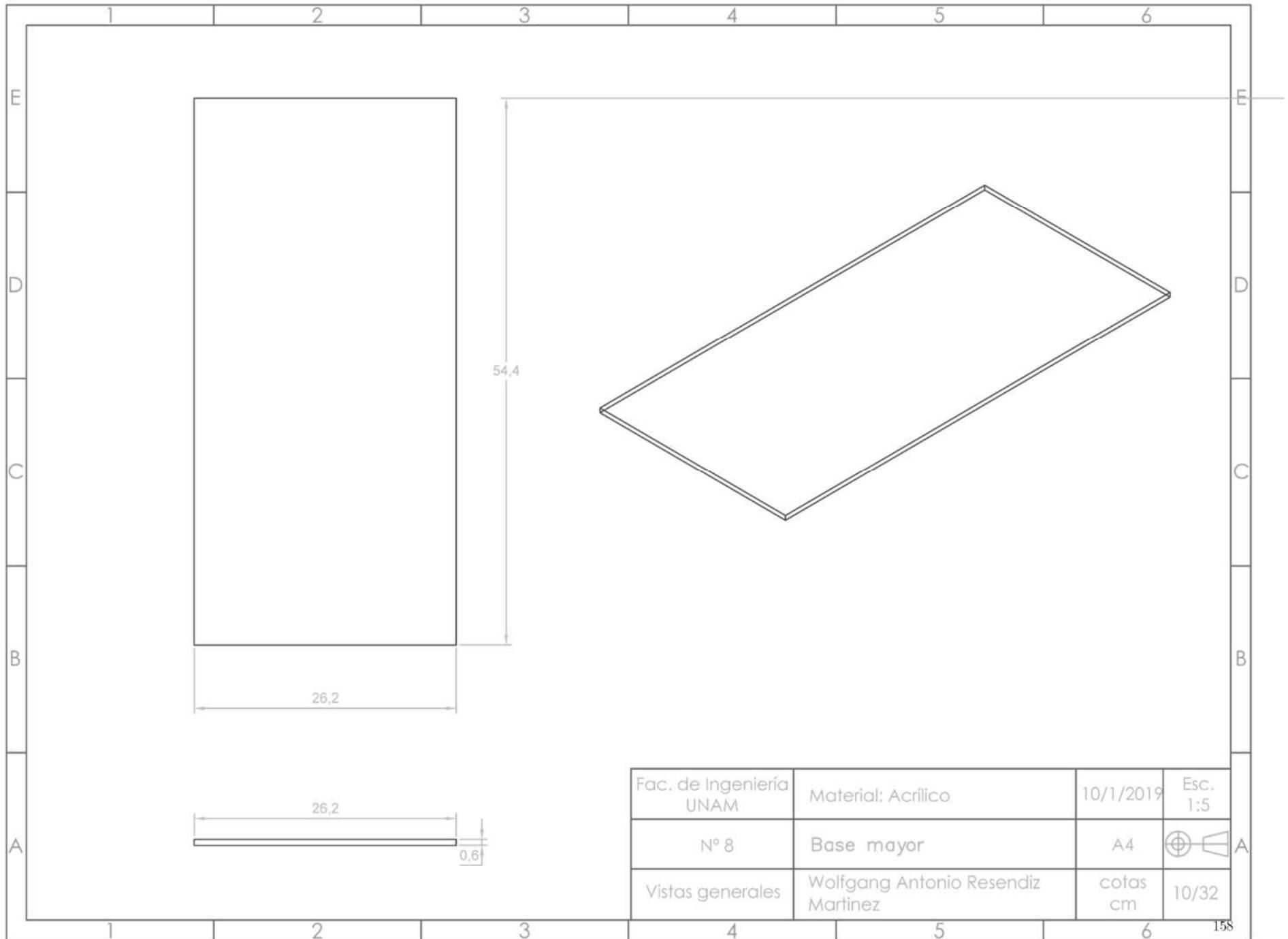
## 12.1. Planos



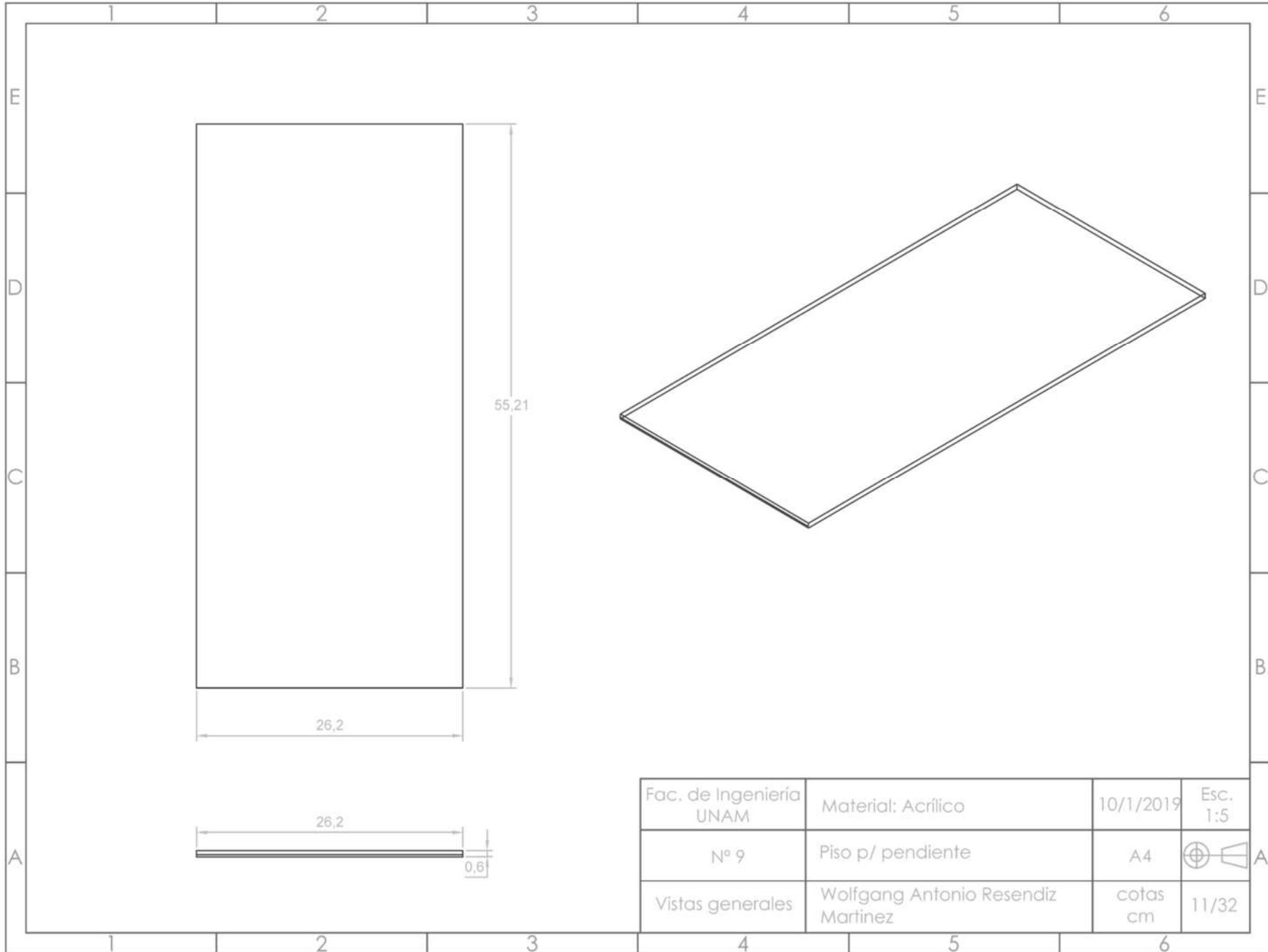




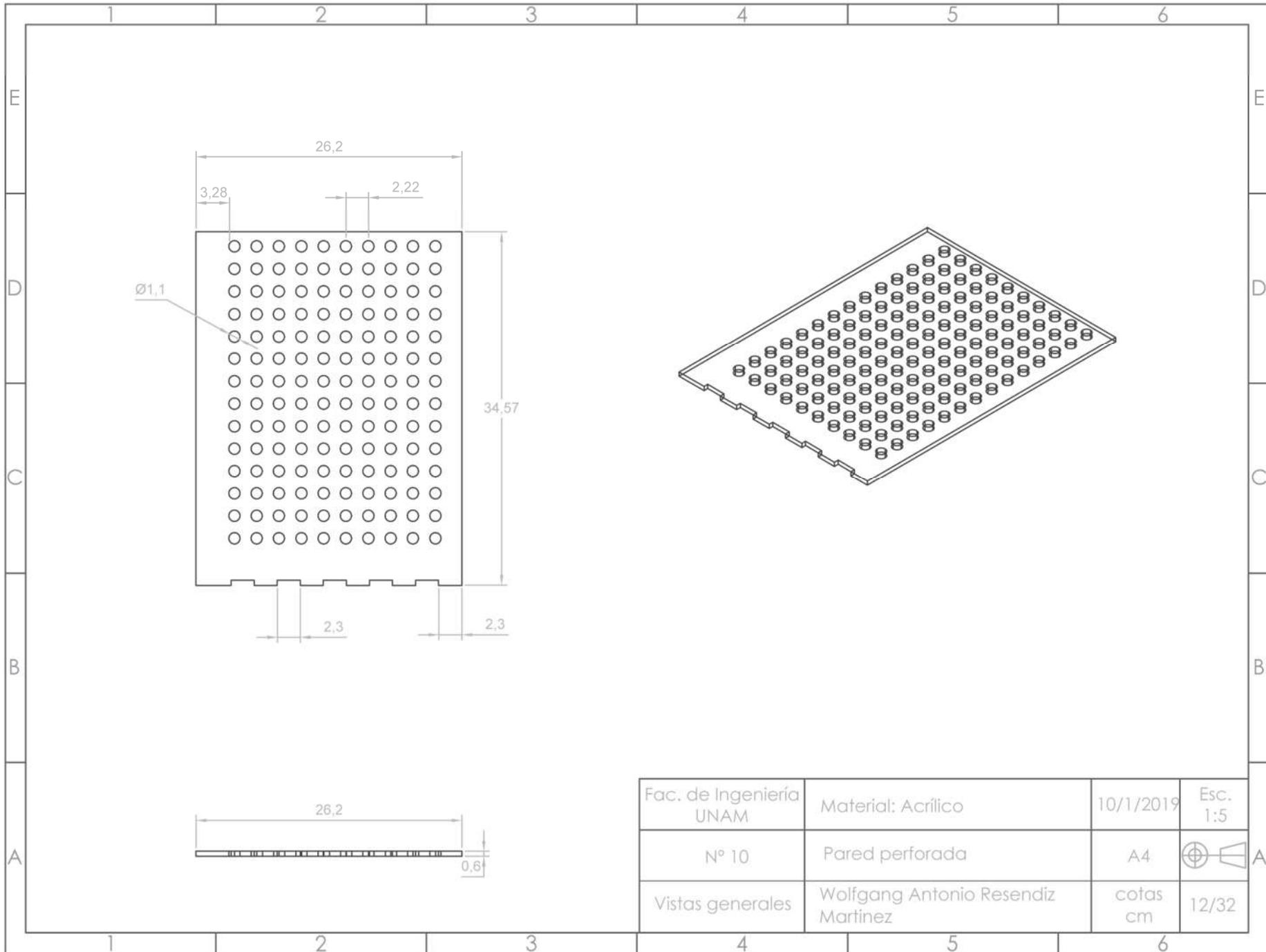




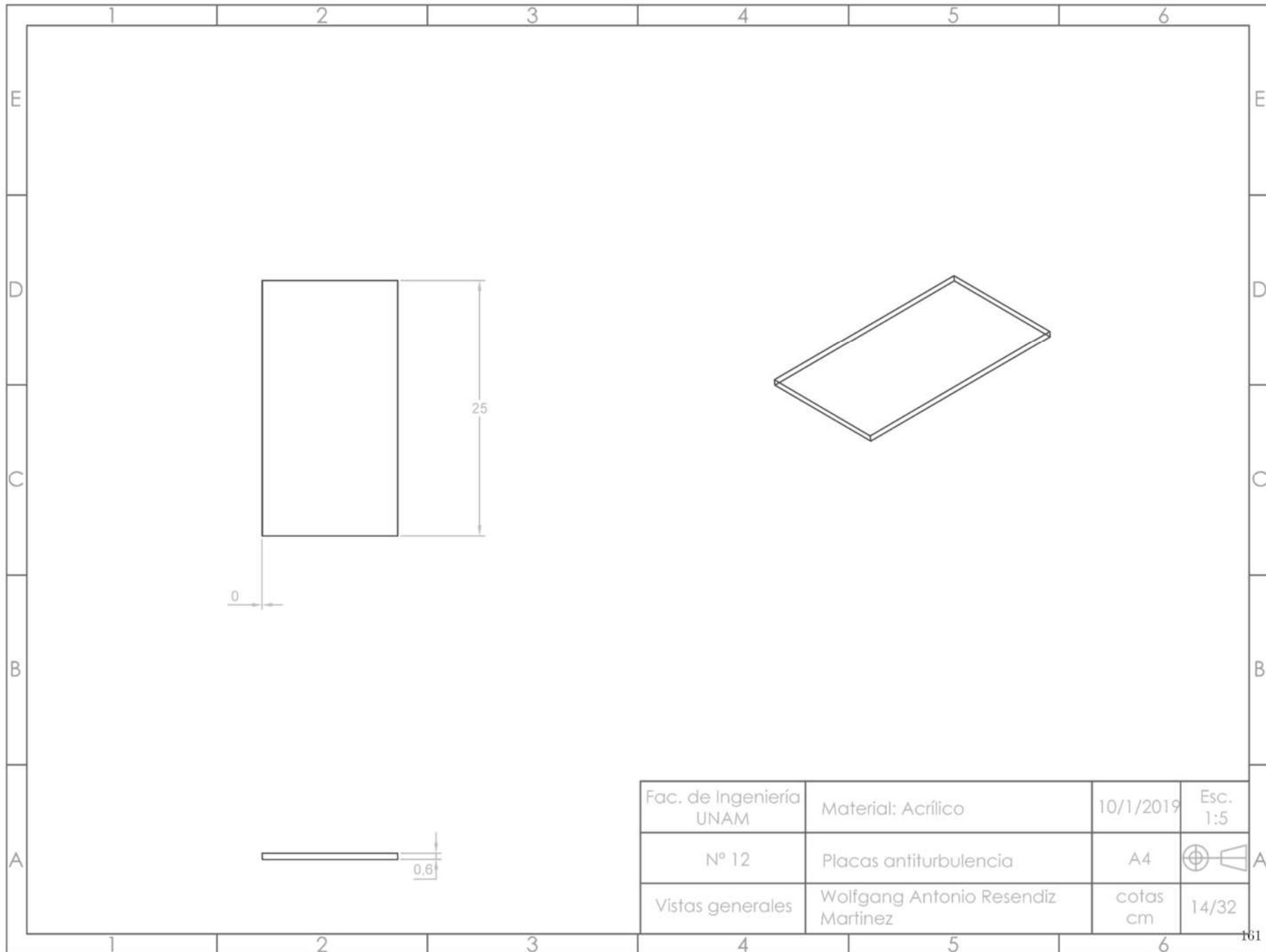
Fac. de Ingeniería UNAM	Material: Acrílico	10/1/2019	Esc. 1:5
Nº 8	Base mayor	A4	⊕ A
Vistas generales	Wolfgang Antonio Resendiz Martinez	cotas cm	10/32



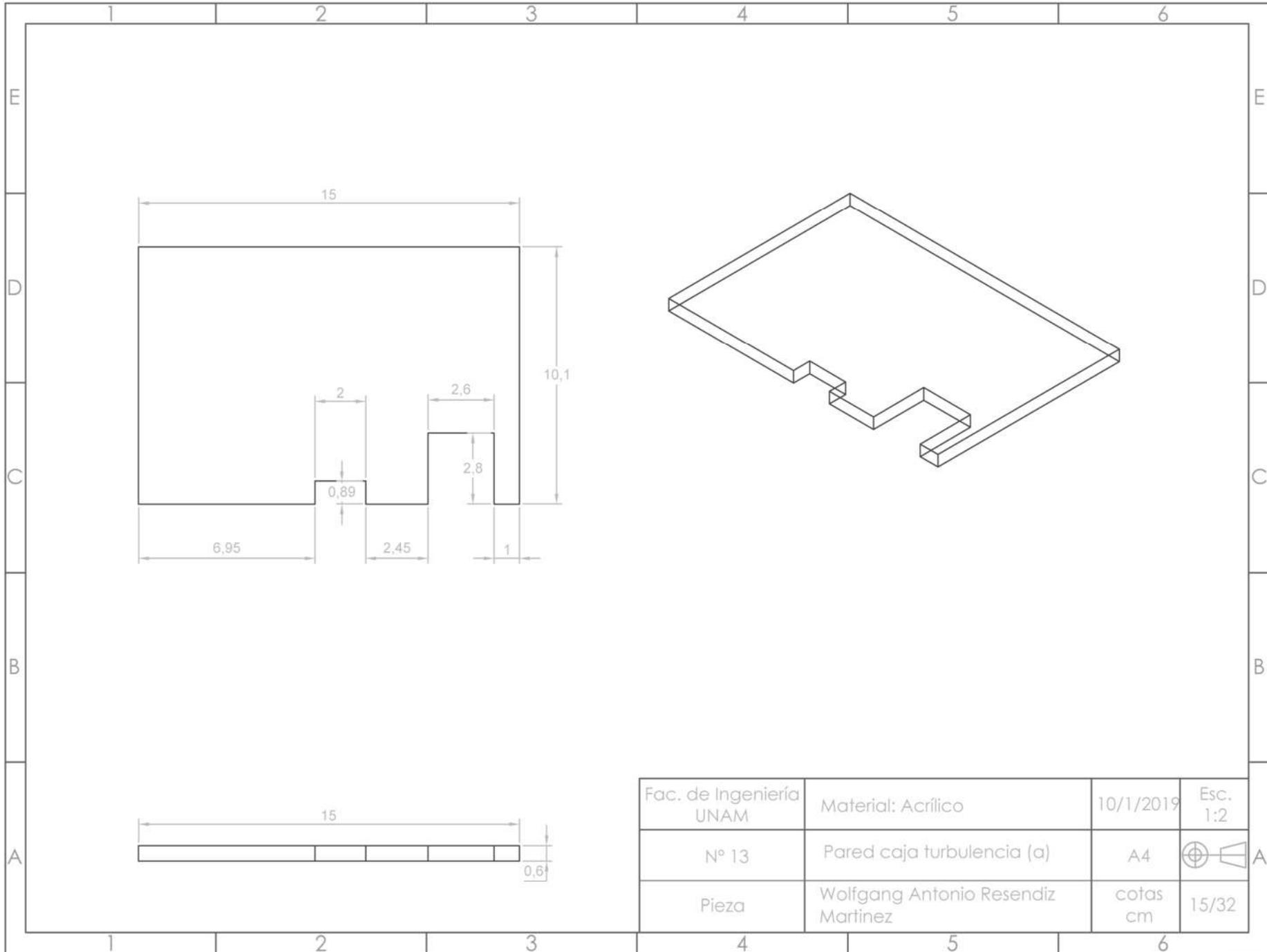
Fac. de Ingeniería UNAM	Material: Acrílico	10/1/2019	Esc. 1:5
Nº 9	Piso p/ pendiente	A4	⊕ ◁ A
Vistas generales	Wolfgang Antonio Resendiz Martinez	cotas cm	11/32



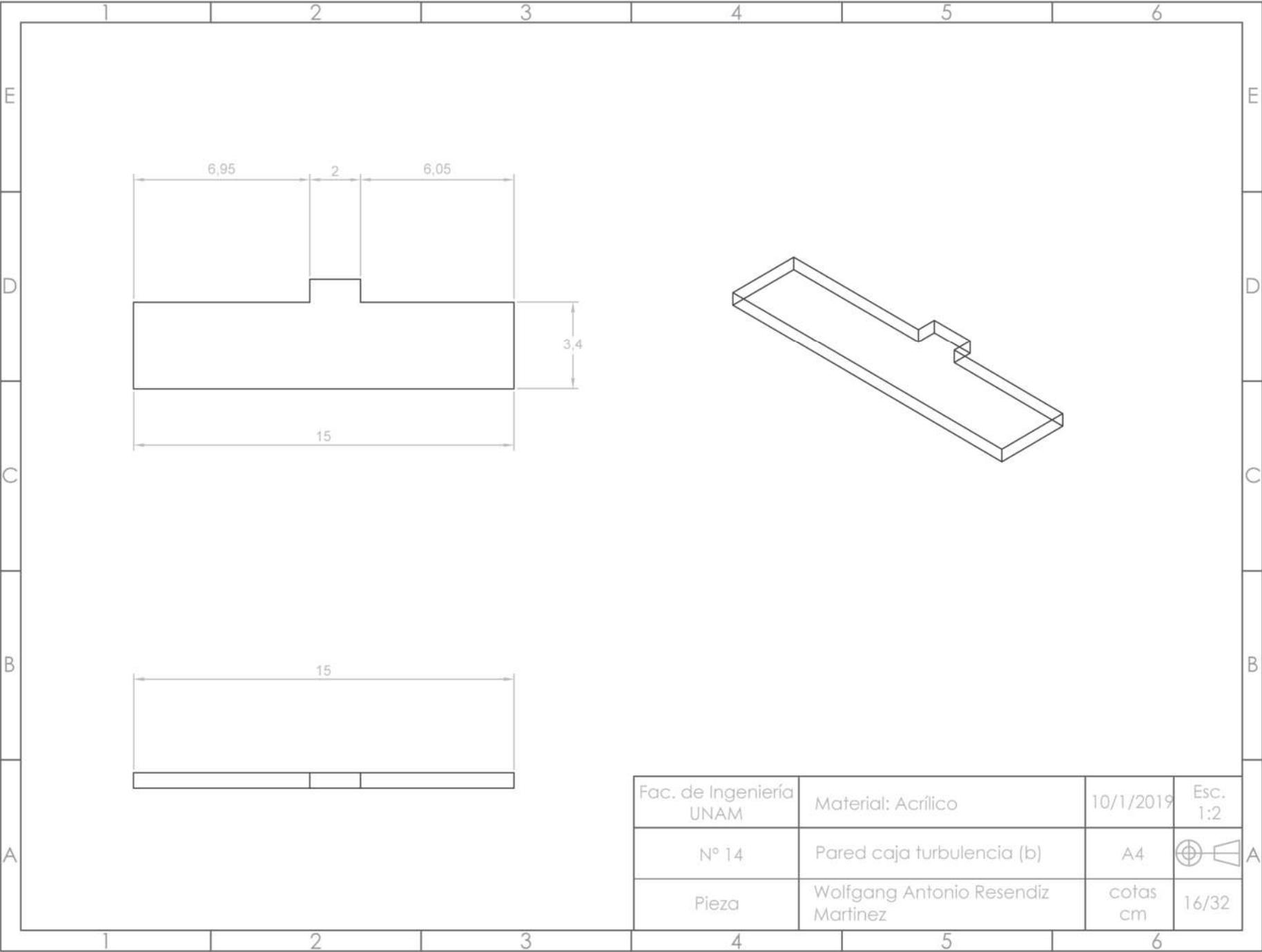
Fac. de Ingeniería UNAM	Material: Acrílico	10/1/2019	Esc. 1:5
Nº 10	Pared perforada	A4	
Vistas generales	Wolfgang Antonio Resendiz Martínez	cotas cm	12/32



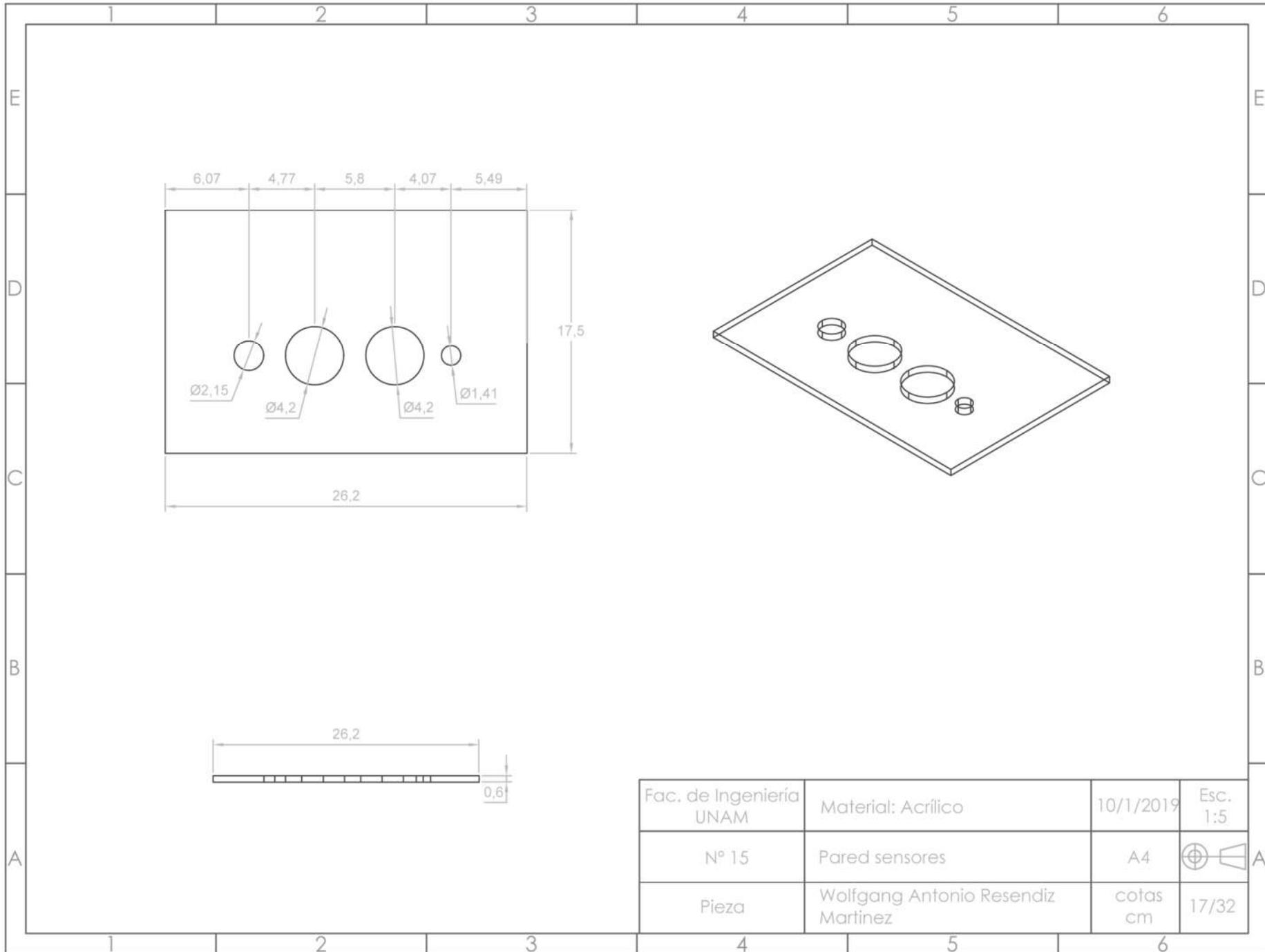
Fac. de Ingeniería UNAM	Material: Acrílico	10/1/2019	Esc. 1:5
N° 12	Placas antiturbulencia	A4	
Vistas generales	Wolfgang Antonio Resendiz Martinez	cotas cm	14/32

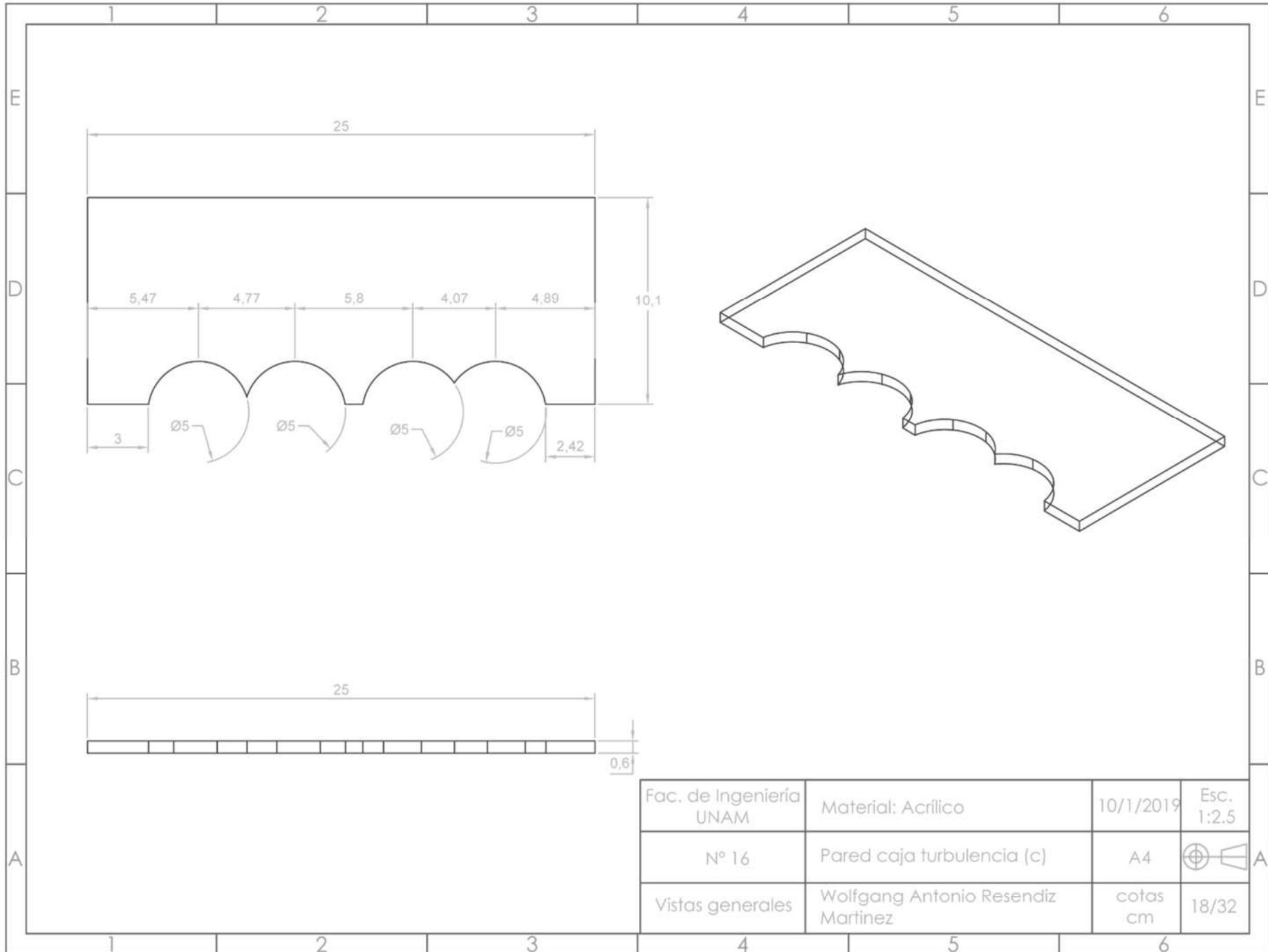


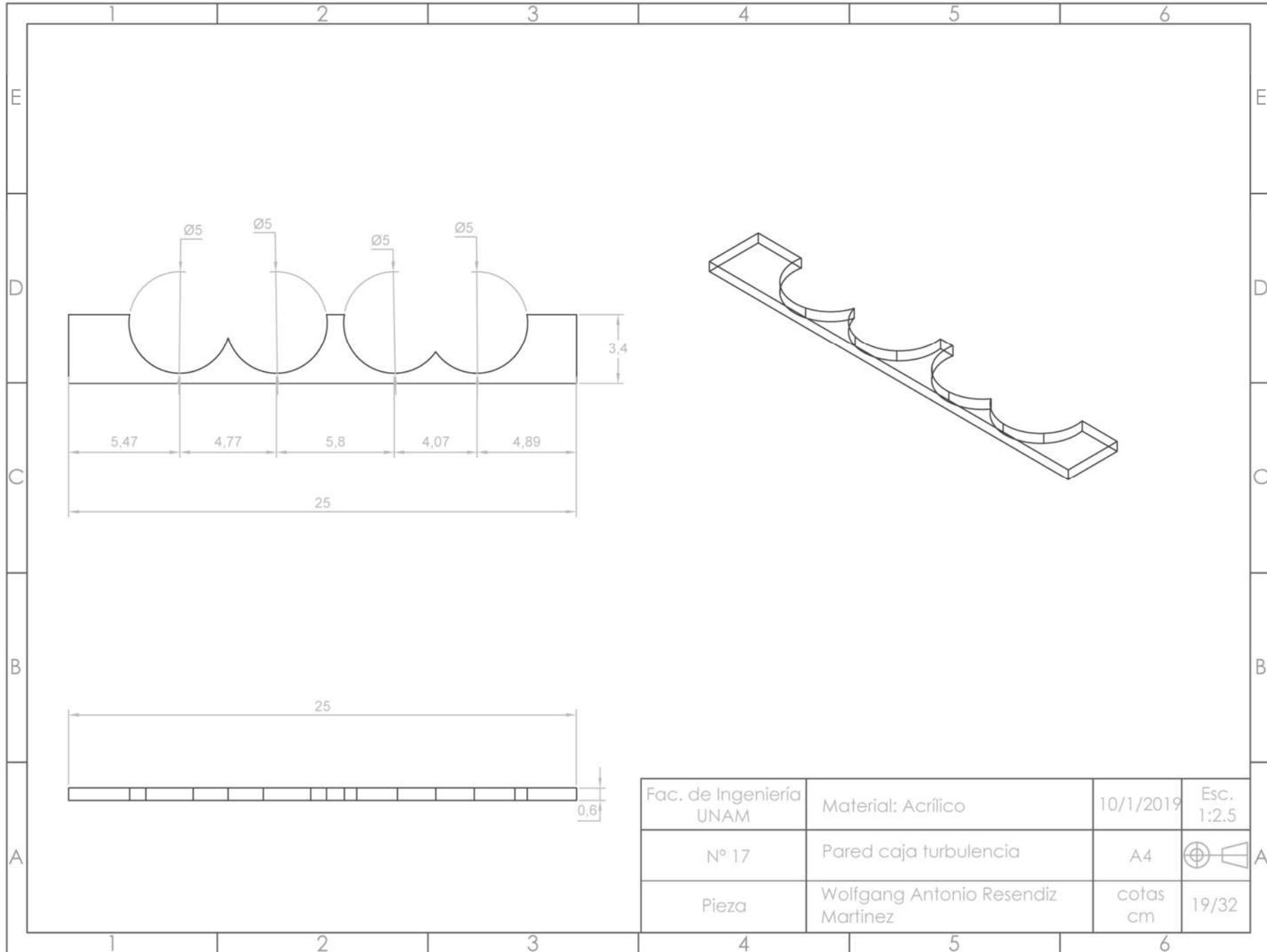
Fac. de Ingeniería UNAM	Material: Acrílico	10/1/2019	Esc. 1:2
N° 13	Pared caja turbulencia (a)	A4	 A
Pieza	Wolfgang Antonio Resendiz Martinez	cotas cm	15/32



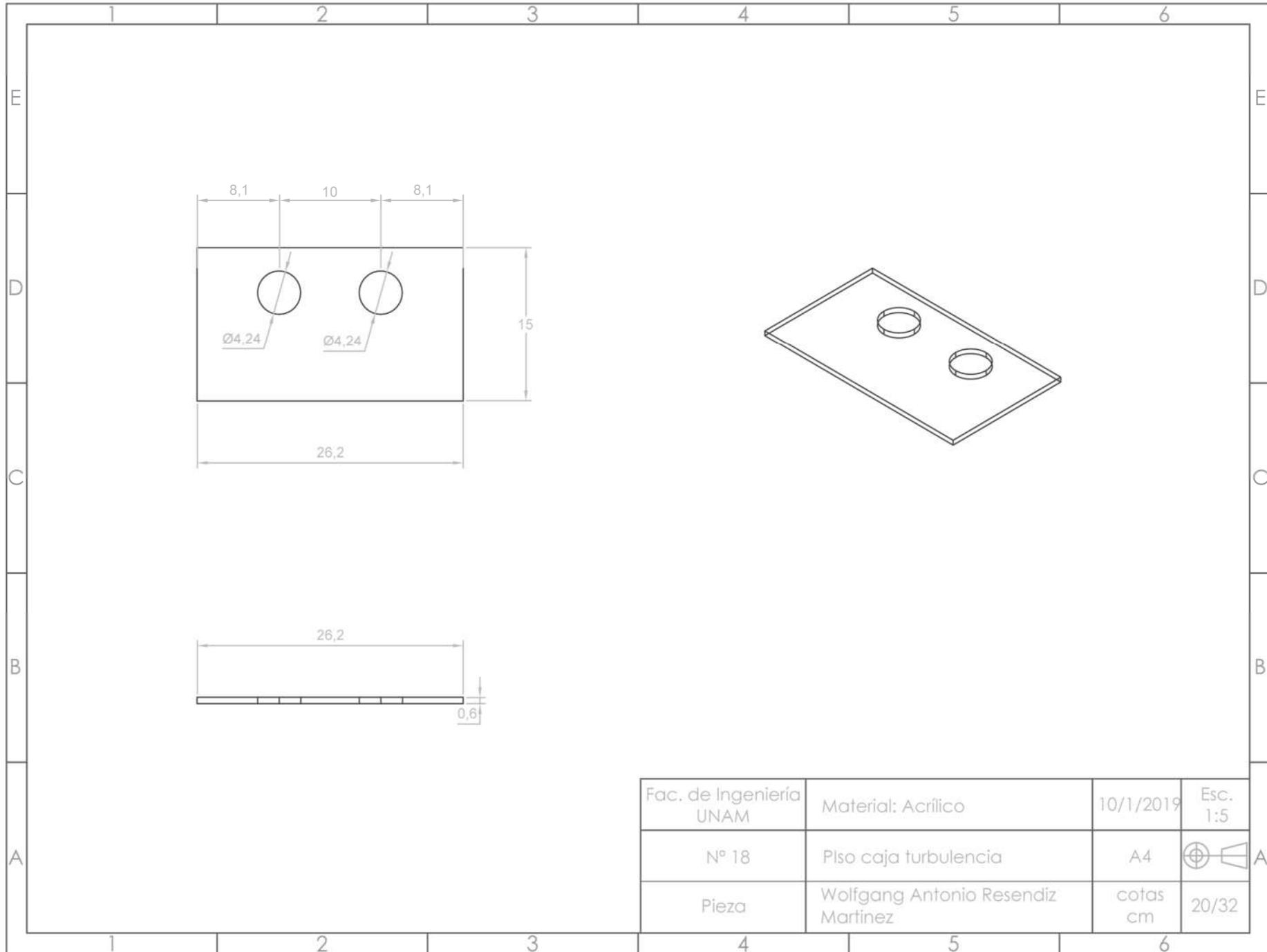
Fac. de Ingeniería UNAM	Material: Acrílico	10/1/2019	Esc. 1:2
N° 14	Pared caja turbulencia (b)	A4	 A
Pieza	Wolfgang Antonio Resendiz Martinez	cotas cm	16/32



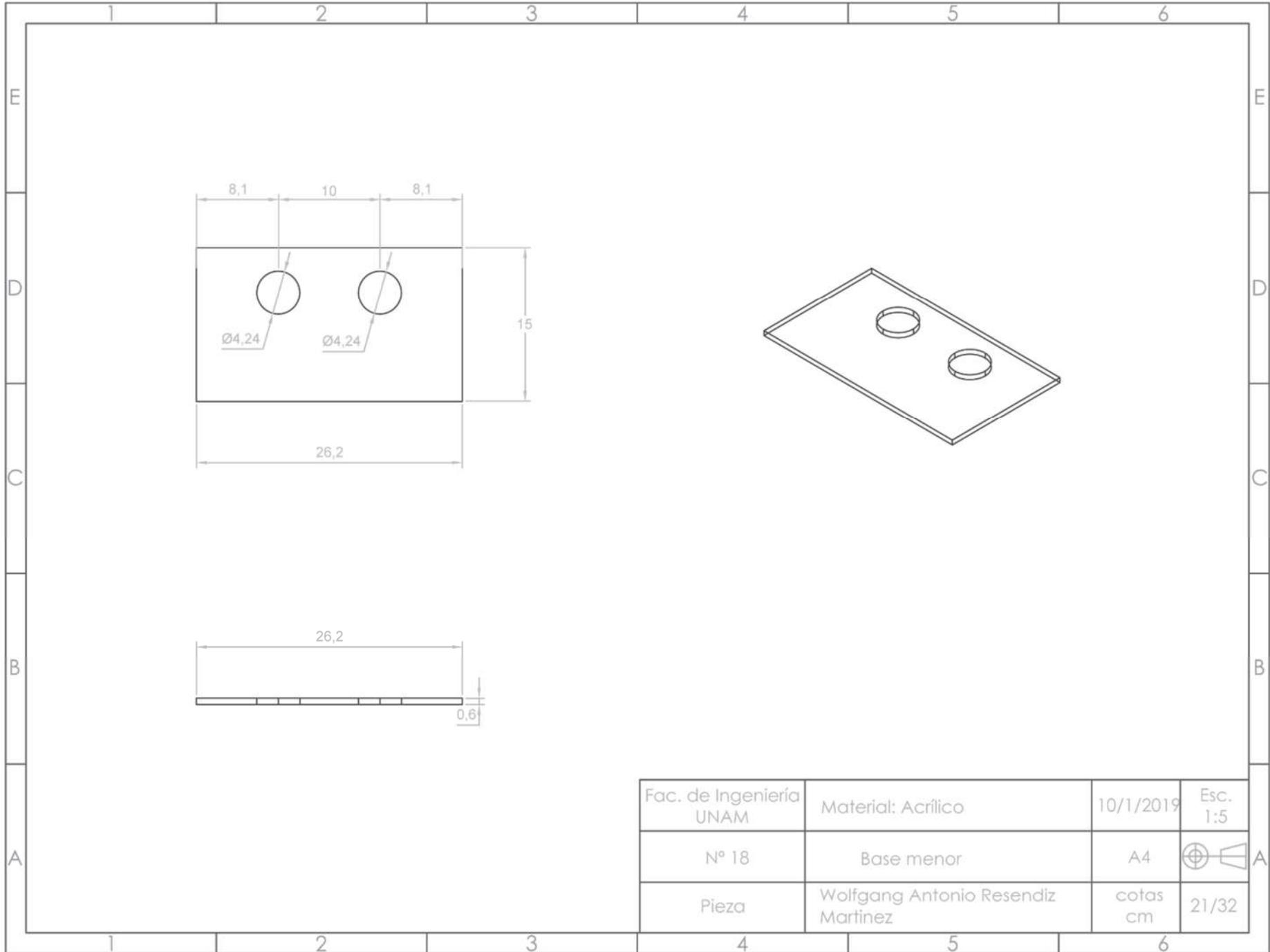




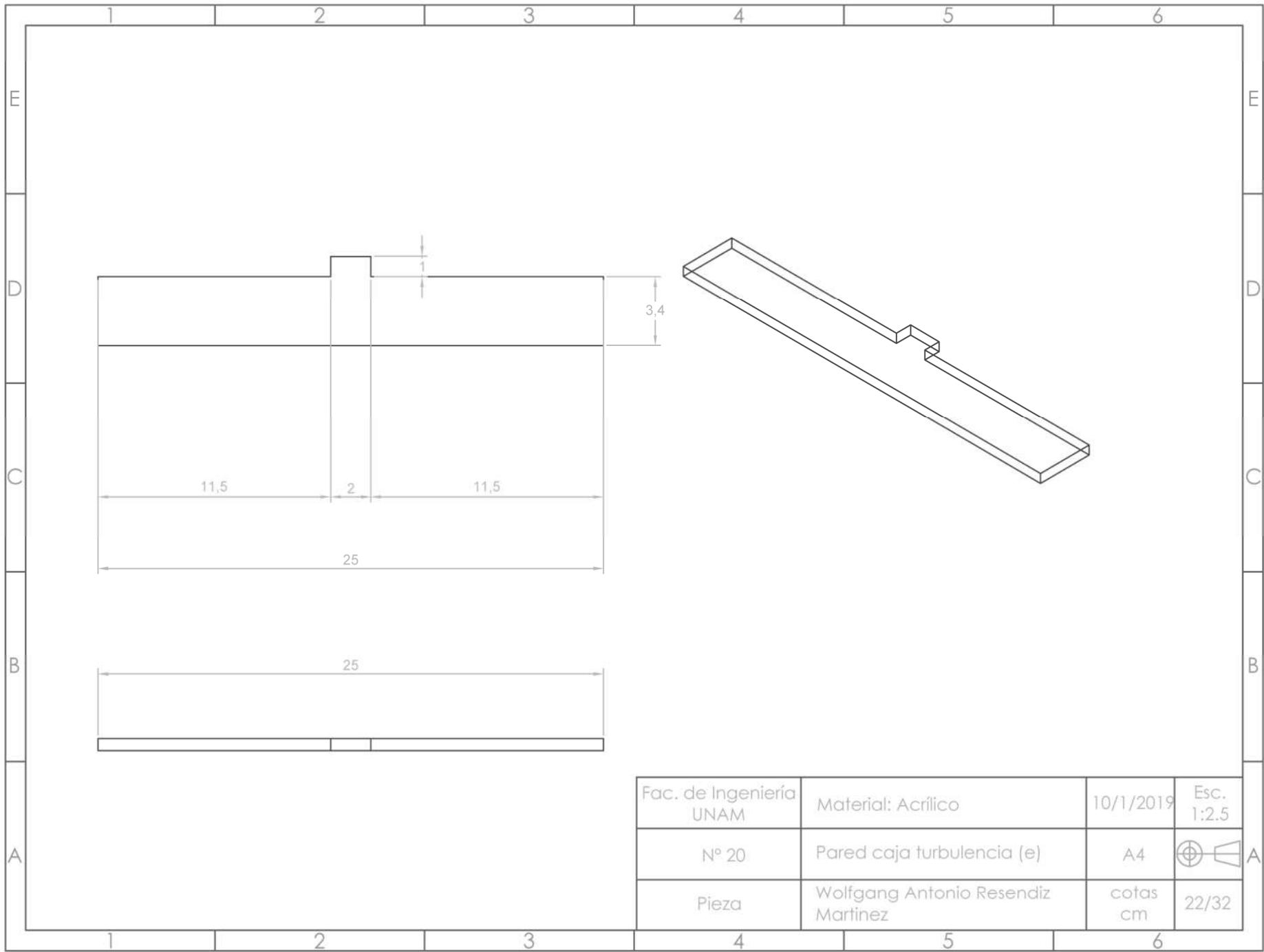
Fac. de Ingeniería UNAM	Material: Acrílico	10/1/2019	Esc. 1:2.5
N° 17	Pared caja turbulencia	A4	
Pieza	Wolfgang Antonio Resendiz Martinez	cotas cm	19/32



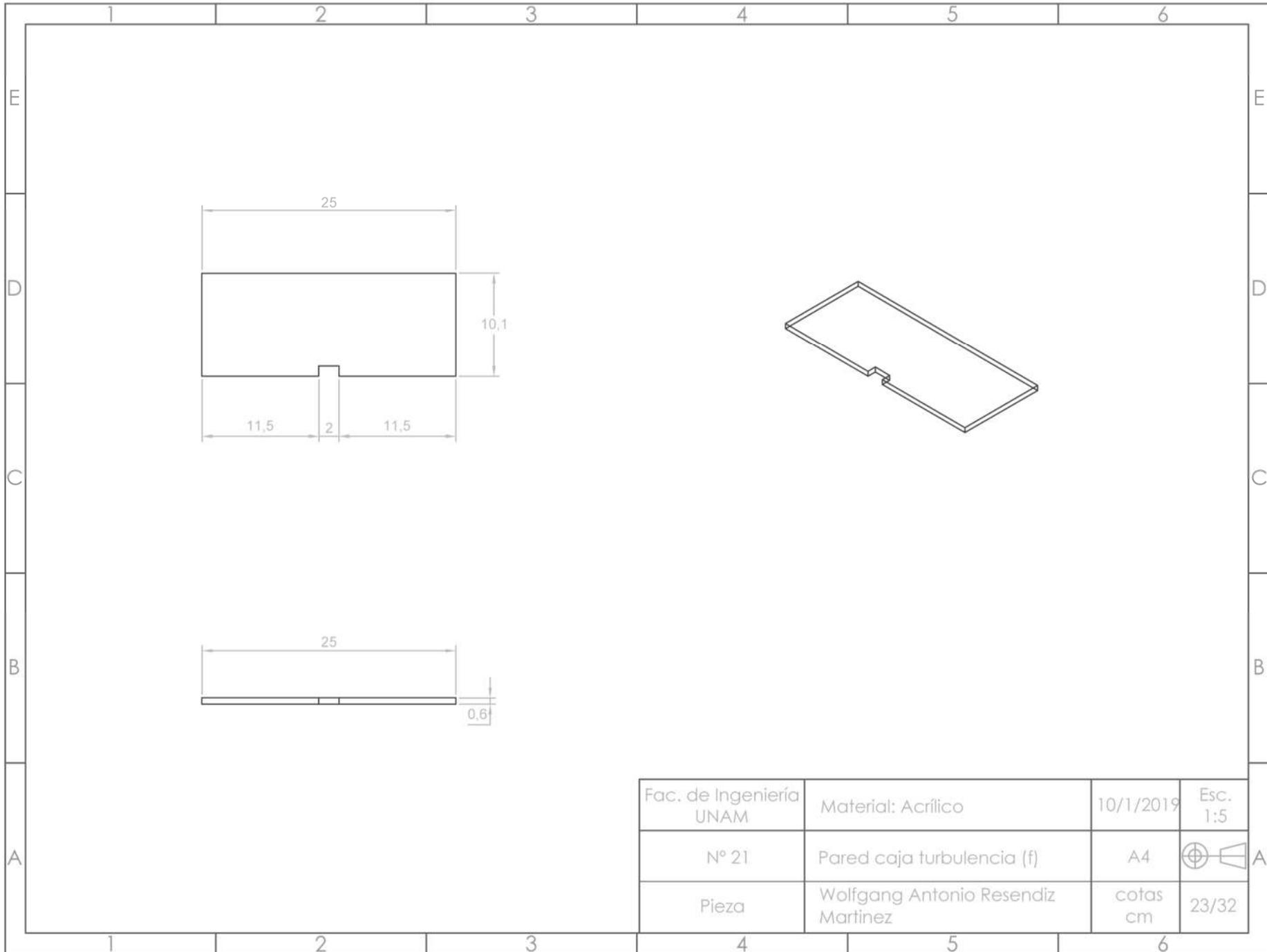
Fac. de Ingeniería UNAM	Material: Acrílico	10/1/2019	Esc. 1:5
N° 18	Pls caja turbulencia	A4	
Pieza	Wolfgang Antonio Resendiz Martinez	cotas cm	20/32



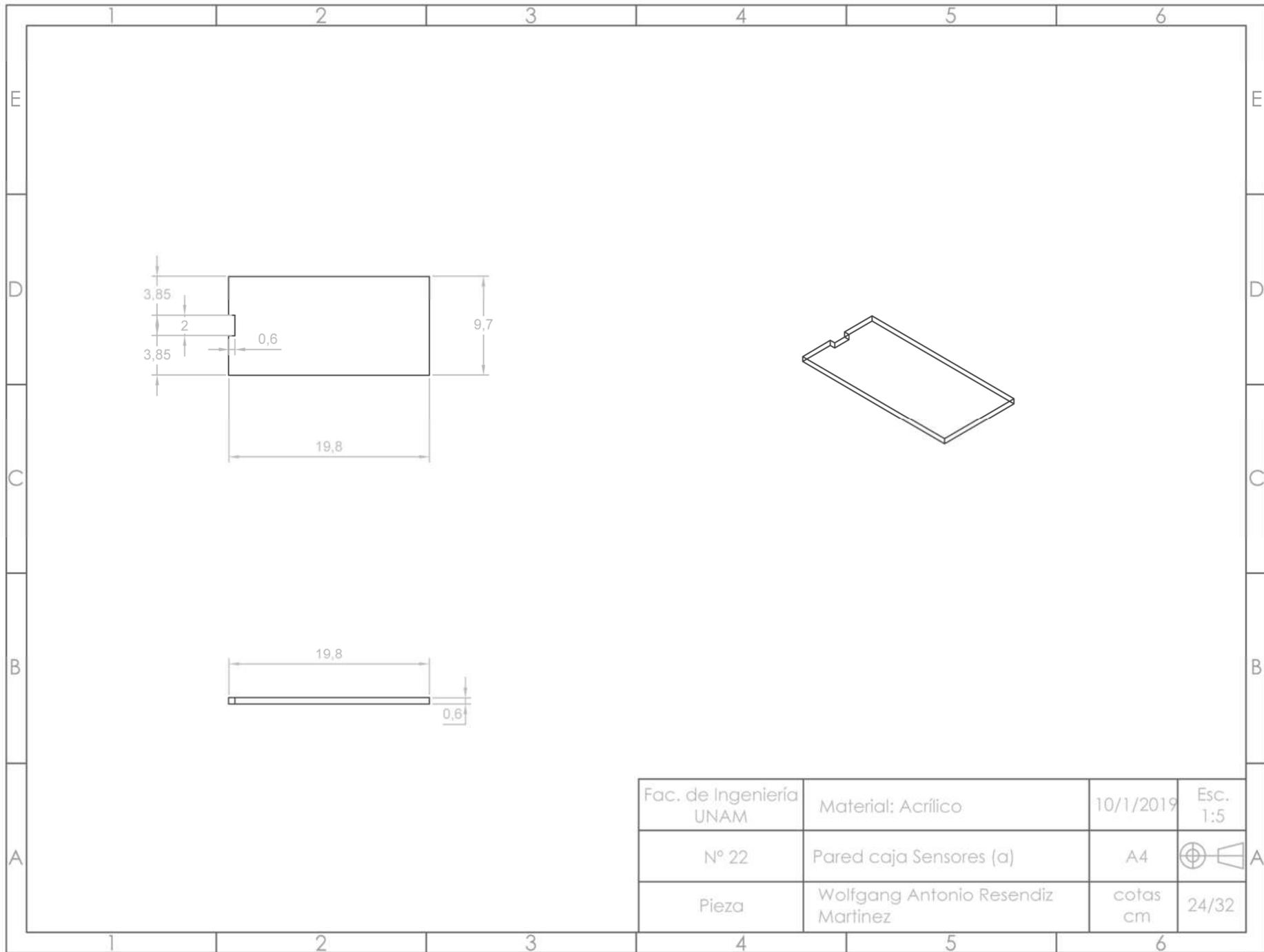
Fac. de Ingeniería UNAM	Material: Acrílico	10/1/2019	Esc. 1:5
N° 18	Base menor	A4	 A
Pieza	Wolfgang Antonio Resendiz Martinez	cotas cm	21/32



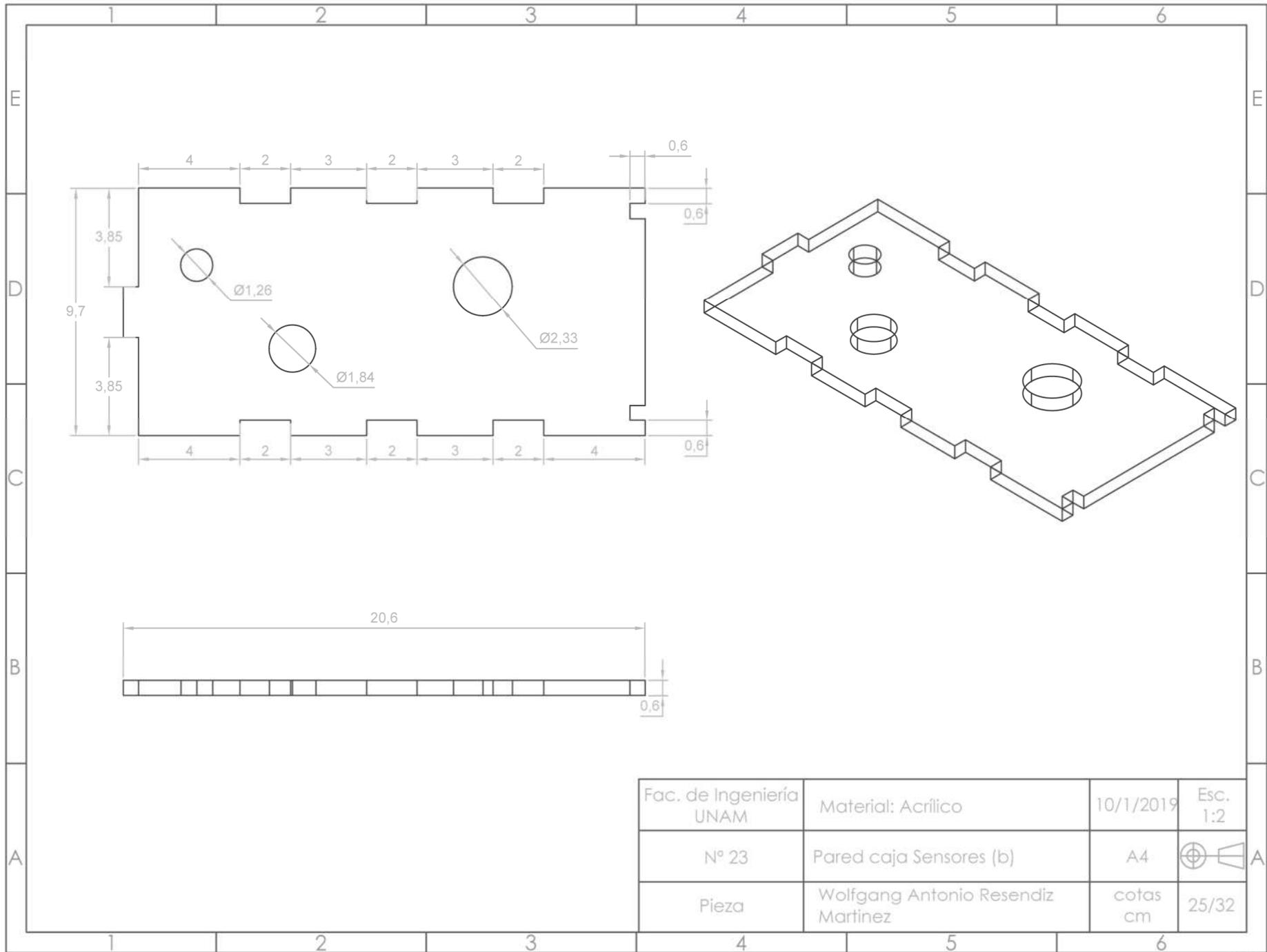
Fac. de Ingeniería UNAM	Material: Acrílico	10/1/2019	Esc. 1:2.5
N° 20	Pared caja turbulencia (e)	A4	 A
Pieza	Wolfgang Antonio Resendiz Martinez	cotas cm	22/32



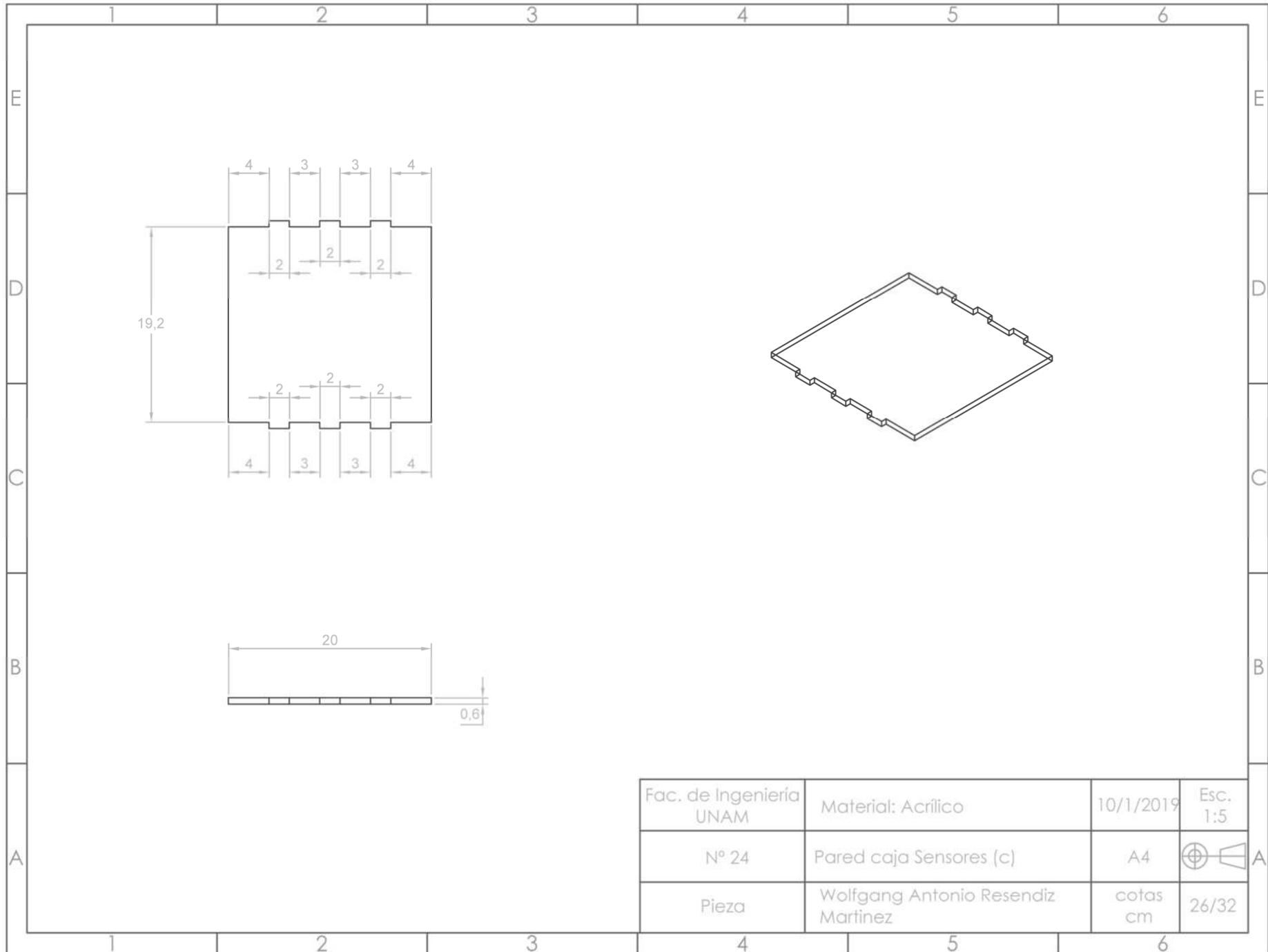
Fac. de Ingeniería UNAM	Material: Acrílico	10/1/2019	Esc. 1:5
N° 21	Pared caja turbulencia (f)	A4	 A
Pieza	Wolfgang Antonio Resendiz Martinez	cotas cm	23/32



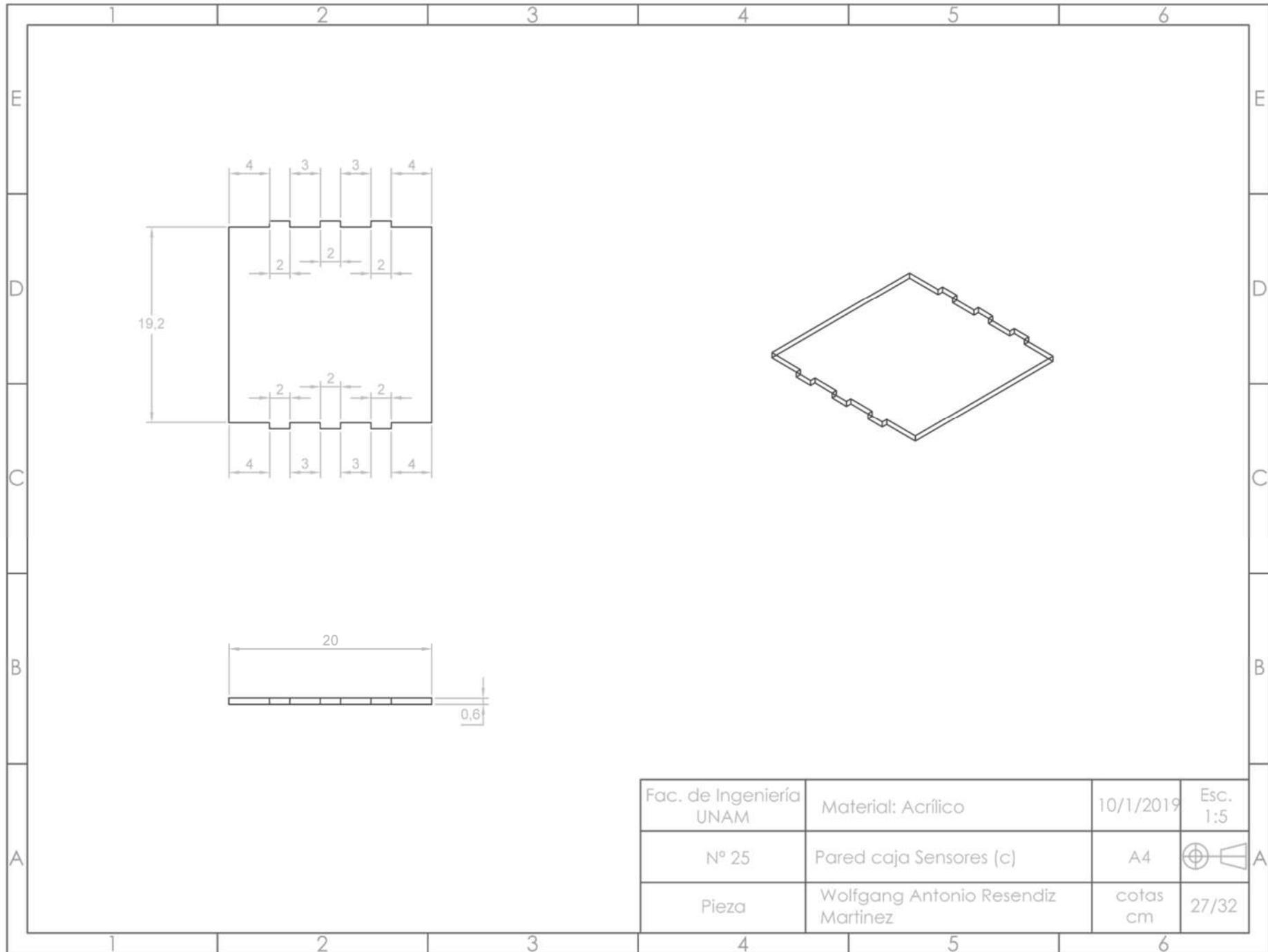
Fac. de Ingeniería UNAM	Material: Acrílico	10/1/2019	Esc. 1:5
N° 22	Pared caja Sensores (a)	A4	 A
Pieza	Wolfgang Antonio Resendiz Martinez	cotas cm	24/32



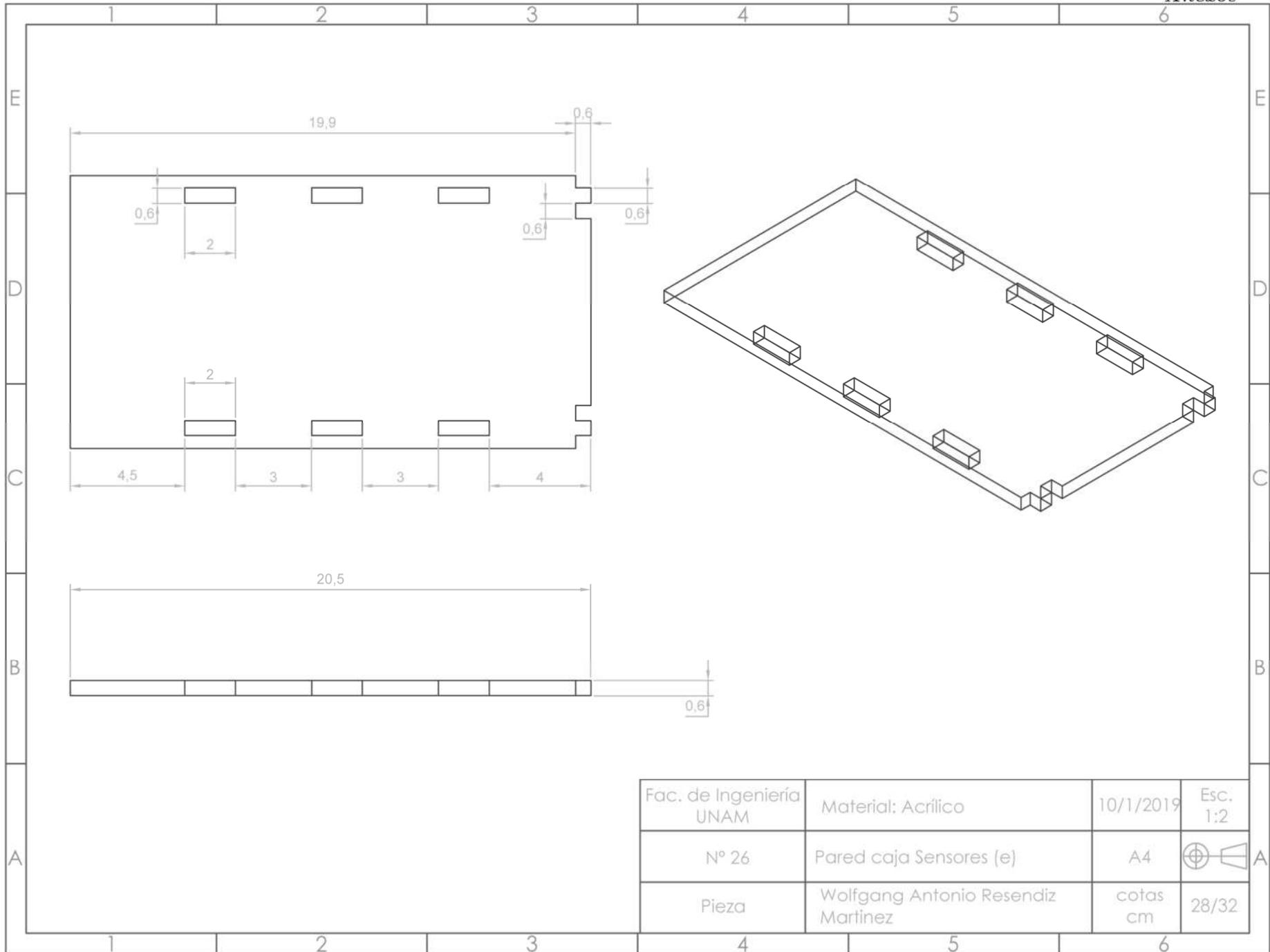
Fac. de Ingeniería UNAM	Material: Acrílico	10/1/2019	Esc. 1:2
N° 23	Pared caja Sensores (b)	A4	
Pieza	Wolfgang Antonio Resendiz Martinez	cotas cm	25/32

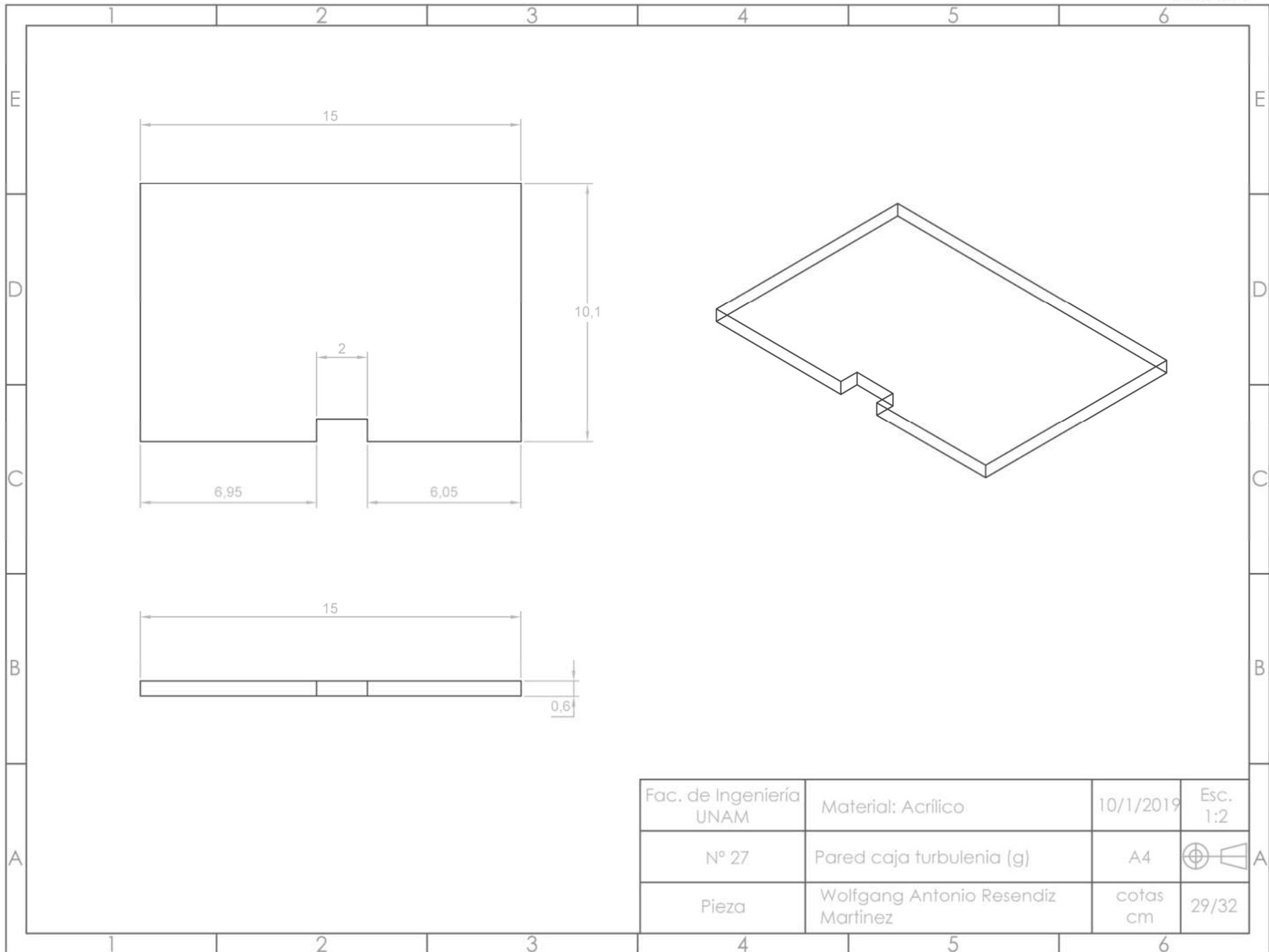


Fac. de Ingeniería UNAM	Material: Acrílico	10/1/2019	Esc. 1:5
Nº 24	Pared caja Sensores (c)	A4	
Pieza	Wolfgang Antonio Resendiz Martínez	cotas cm	26/32

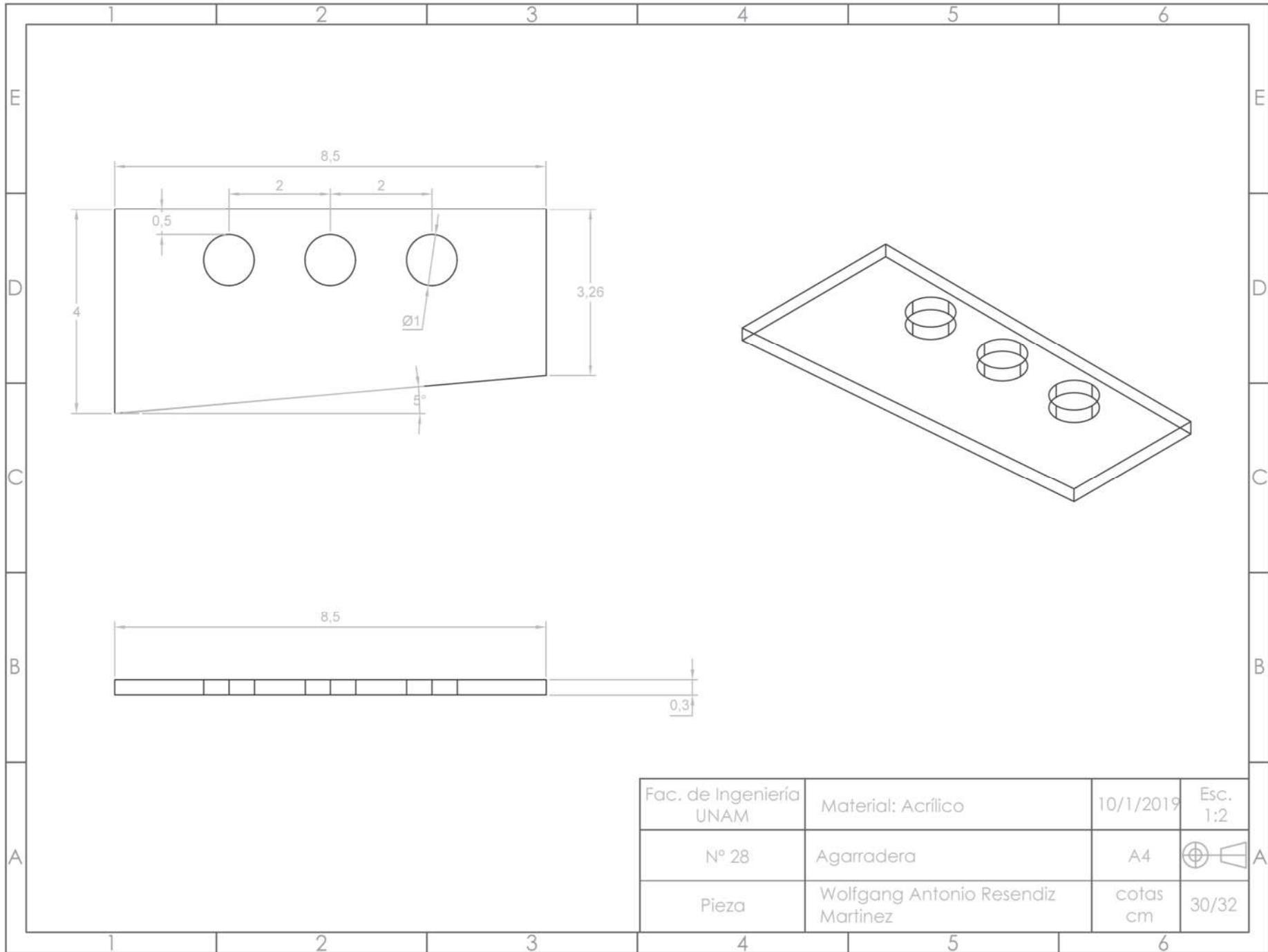


Fac. de Ingeniería UNAM	Material: Acrílico	10/1/2019	Esc. 1:5
N° 25	Pared caja Sensores (c)	A4	 A
Pieza	Wolfgang Antonio Resendiz Martinez	cotas cm	27/32

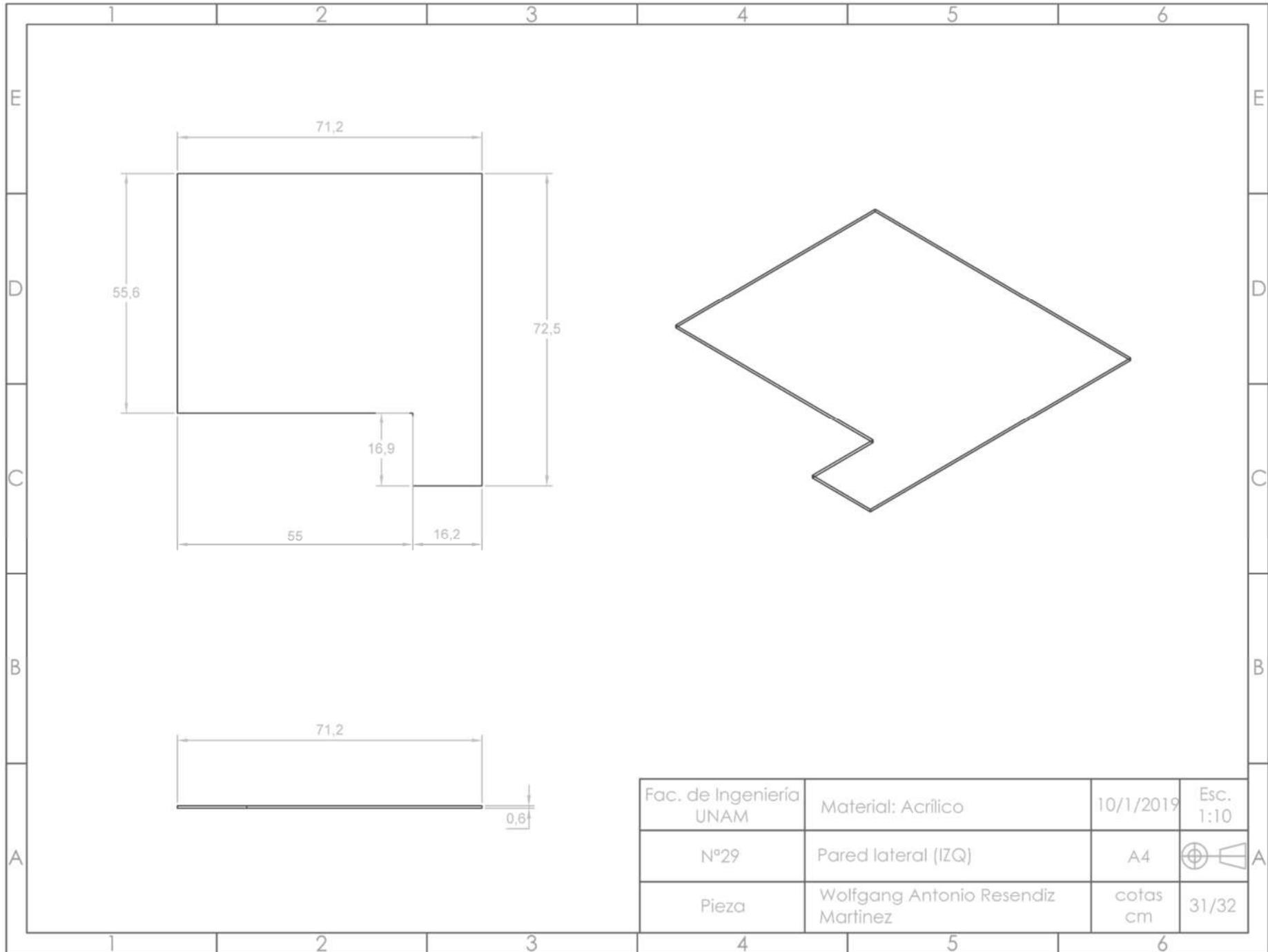




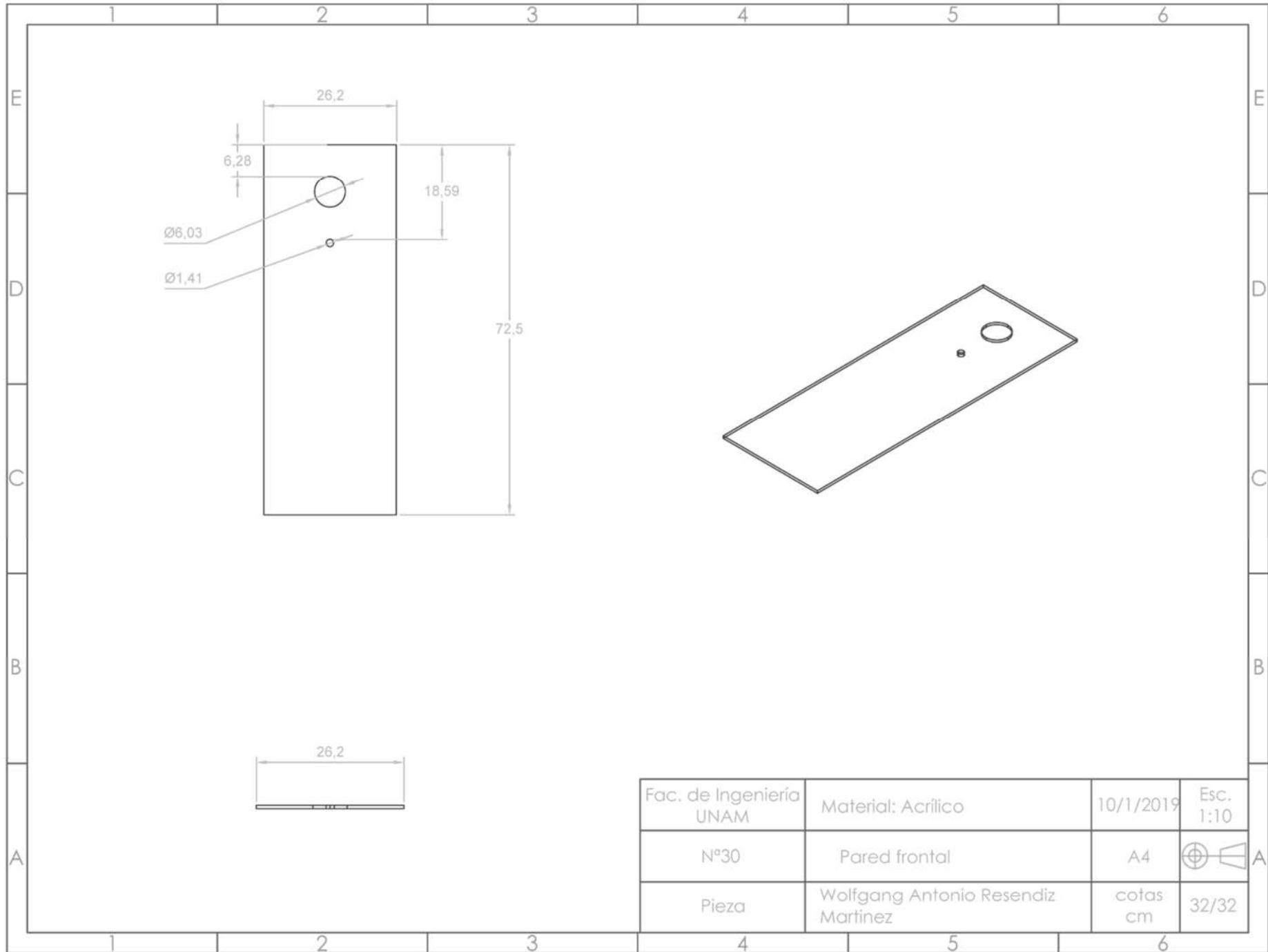
Fac. de Ingeniería UNAM	Material: Acrílico	10/1/2019	Esc. 1:2
Nº 27	Pared caja turbulencia (g)	A4	 A
Pieza	Wolfgang Antonio Resendiz Martinez	cotas cm	29/32



Fac. de Ingeniería UNAM	Material: Acrílico	10/1/2019	Esc. 1:2
N° 28	Agarradera	A4	
Pieza	Wolfgang Antonio Resendiz Martinez	cotas cm	30/32



Fac. de Ingeniería UNAM	Material: Acrílico	10/1/2019	Esc. 1:10
Nº29	Pared lateral (IZQ)	A4	 A
Pieza	Wolfgang Antonio Resendiz Martinez	cotas cm	31/32



## 12.2. Código Arduino

```

#include <DallasTemperature.h> /*para temperatura*/
#include <DS1307RTC.h> /*Librería RTC*/
#include <OneWire.h> /*para temperatura*/
#include <TimeLib.h> /*Librería de tiempo*/
#include <Wire.h> /*para Pantalla lcd y RTC*/
#include <SoftwareSerial.h> /*Para comunicación serial*/

/*Tiempos*/

unsigned long tiempoActualTemperatura;
unsigned long tiempoAnteriorTemperatura; //tiempo para el
retraso en la toma de temperatura
unsigned long tiempoTranscurridoTemperatura;
const unsigned long tiempoEsperaTemperatura = 60000UL;
//Tiempo para tomar temperatura, cada minuto porque el
sensor tarda bastante en tomar datos, relentizaría el proceso

unsigned long tiempoActualDesfogue;
unsigned long tiempoAnteriorDesfogue; //tiempo para el des-
fogue cada 20 min despues de iniciado un evento
unsigned long tiempoTranscurridoDesfogue;
const unsigned long tiempoEsperaDesfogue = 60000UL;

unsigned long tiempoActualValvula;
unsigned long tiempoAnteriorValvula; //tiempo para abrir o
cerrar una válvula
unsigned long tiempoTranscurridoValvula;
const unsigned long tiempoEsperaValvula = 10000UL; //10
segundos

int estadoDesfogue;
int desfogueMediaNoche;

/**/Limites para discriminar*/

float limite_pH[2] = {5.0, 8.0};
float limite_tds = 1;

/*Definición de los pines*/
const byte pin_electronivel[4] = {7, 6, 5, 4}; /*Electronivel 0-
5 en el pin {4,5,6,7} de Arduino*/
const byte pin_limpia = 12; /*Relay [limpia,dre-
naje] en el pin [12,13] de Arduino*/
const byte pin_drenaje = 13;
const byte pin_sensor_temperatura = 9; /*Sensor de Tempe-
ratura en el pin 6 de Arduino*/
const byte pin_sensor_turbidez = 8; /*Sensor de turbidez
1 en el pin A1 de Arduino*/

#define pin_sensor_ph A0 /*Sensor de pH en el pin A0 de
Arduino*/

/*pin SLC A5 Estos pines sirven para la comunicacion
I2c con
pin SDA A4 el módulo RTC
*/

/*Variables para los estados de los electroniveles*/
const int datos_electro = 100; /*Numero de datos que
se van a tomar*/
const unsigned long delay_electro = 5; /*Delay entre datos
electronivel*/

/*Variables y constantes para el pH*/
/*pin_sensor_ph A0 se determino arriba*/
float valor_promedio_ph; //Guarda el valor promedio
float valor_de_ph;
int array_muestras_ph[10], temporal_ph;

const int datos_pH = 10;
const unsigned long delay_pH = 5;

/*Variables y constantes para la turbidez*/

const int datos_turbidez = 200; /*Numero de datos que se
van a tomar*/
const unsigned long delay_turbidez = 10;

/*Variables para el DEBUGUEO*/

float d_temperatura = 0;
float d_pH = 0;
float d_tds = 0;
int d_turbidez = 0;
byte d_electronivel[4] = {0, 0, 0, 0};
byte d_relay[2] = {0, 0};
String d_datosJson;
/*variables de fecha y hora*/
tmElements_t fecha_hora;

/*Iniciar las librerías*/
OneWire el_wire(pin_sensor_temperatura); /*Se esta-
blece el pin declarado como bus para la comunicación OneWire
(temperatura)*/
DallasTemperature sensor_temperatura(&el_wire); /*Se ini-
cia la librería DallasTemperature*/
SoftwareSerial sw(2, 3); // RX, TX

void setup()
{
  Serial.begin(115200); /*Se inician comunicaciones con
el PC*/
  sensor_temperatura.begin(); /*Se inician comunicaciones
con el sensor de temperatura*/

```

```

for (int i = 0; i <= 3; i++)
{
    pinMode(pin_electronivel[i], INPUT);
}
pinMode(pin_limpia, OUTPUT);
pinMode(pin_drenaje, OUTPUT);
sw.begin(115200);
Serial.println("*****");
Serial.println("* Pruebas en el monitor Serial *");
Serial.println("*****");
}

void loop()
{
    d_electronivel[0] = estadoElectronivel(pin_electronivel[0],
datos_electro, delay_electro); //Revisa primer electronivel
    switch (d_electronivel[0])
    {
        case 1: //Se enciende un electronivel
            desfogueMediaNoche = 1;
            d_electronivel[1] = estadoElectronivel(pin_electronivel[1],
datos_electro, delay_electro); // Revisa segundo electronivel
            switch (d_electronivel[1])
            {
                case 1: //Se encienden los dos electroniveles
                    d_turbidez = estadoTurbidezDigital(pin_sensor_turbidez,
datos_turbidez, delay_turbidez);
                    d_pH = funcionPH(datos_pH, delay_pH);
                    tiempoActualTemperatura = millis();
                    tiempoTranscurridoTemperatura = (tiempoActualTemperatura -
tiempoAnteriorTemperatura); //tiempoAnteriorTemperatura es para la temperatura, tomada cada (1 min)
                    tiempoTemperatura
                    if (tiempoTranscurridoTemperatura >= tiempoEsperaTemperatura)
                    {
                        d_temperatura = funcionTemperatura();
                        tiempoAnteriorTemperatura = millis();
                    }
                    switch (d_turbidez)
                    {
                        case 1: //Turbidez ADECUADA
                            tiempoActualValvula = millis();
                            tiempoTranscurridoValvula = (tiempoActualValvula -
tiempoAnteriorValvula);
                            if (tiempoTranscurridoValvula >= tiempoEsperaValvula)
                            {
                                digitalWrite(pin_limpia, HIGH);
                                d_relay[0] = 1;
                                digitalWrite(pin_drenaje, LOW);
                                d_relay[1] = 0;
                                tiempoAnteriorValvula = millis();
                            }
                            estadoDesfogue = 0; //Desactivar desfogue
                            break;
                        case 0: //Turbidez INADECUADA
                            tiempoActualValvula = millis();

```

```

                            tiempoTranscurridoValvula = (tiempoActualValvula -
tiempoAnteriorValvula);
                            if (tiempoTranscurridoValvula >= tiempoEsperaValvula)
                            {
                                digitalWrite(pin_limpia, LOW);
                                d_relay[0] = 0;
                                digitalWrite(pin_drenaje, HIGH);
                                d_relay[1] = 1;
                                tiempoAnteriorValvula = millis();
                            }
                            estadoDesfogue = 0; //Desactivar desfogue, pues
                            está en funcionamiento
                            break;
                        default:
                            break;
                    }
                }
            }
        case 0: //Sólo se enciende un electronivel
            if (estadoDesfogue == 0)
            {
                estadoDesfogue = 1; //activar el desfogue
                tiempoAnteriorDesfogue = millis();
            }
            tiempoActualValvula = millis();
            tiempoTranscurridoValvula = (tiempoActualValvula -
tiempoAnteriorValvula);
            if (tiempoTranscurridoValvula >= tiempoEsperaValvula)
            {
                digitalWrite(pin_limpia, LOW);
                d_relay[0] = 0;
                digitalWrite(pin_drenaje, LOW);
                d_relay[1] = 0;
                tiempoAnteriorValvula = millis();
            }
            break;
        default:
            break;
    }
}
case 0: // No se enciende ningún electronivel
    tiempoActualValvula = millis();
    tiempoTranscurridoValvula = (tiempoActualValvula -
tiempoAnteriorValvula);
    if (tiempoTranscurridoValvula >= tiempoEsperaValvula)
    {
        digitalWrite(pin_limpia, LOW);
        d_relay[0] = 0;
        digitalWrite(pin_drenaje, LOW);
        d_relay[1] = 0;
        tiempoAnteriorValvula = millis();
    }
}

```

```

    if (desfogueMediaNoche == 1) //Si se activó el proceso
durante el día, desfogar a media noche si no está haciendo
nada
    {
        RTC.read(fecha_hora);
        int l_hora = fecha_hora.Hour;

        if (l_hora == 5)
        {
            digitalWrite(pin_limpia, HIGH);
            d_relay[0] = 1;
            digitalWrite(pin_drenaje, HIGH);
            d_relay[1] = 1;
            tiempoAnteriorDesfogue = millis();
            tiempoAnteriorValvula = millis();
            desfogueMediaNoche = 0;
        }
    }

    break;
default:
    break;
}

tiempoActualDesfogue = millis();
tiempoTranscurridoDesfogue = (tiempoActualDesfogue -
tiempoAnteriorDesfogue);

if ((tiempoTranscurridoDesfogue >= tiempoEsperaDesfo-
gue) && (estadoDesfogue == 1)) //Desfogue para un solo
electronivel
    {
        tiempoActualValvula = millis();
        tiempoTranscurridoValvula = (tiempoActualValvula -
tiempoAnteriorValvula);
        if (tiempoTranscurridoValvula >= tiempoEsperaVal-
vula)
        {
            digitalWrite(pin_limpia, HIGH);
            d_relay[0] = 1;
            digitalWrite(pin_drenaje, HIGH);
            d_relay[1] = 1;
            tiempoAnteriorDesfogue = millis();
            tiempoAnteriorValvula = millis();
            estadoDesfogue = 0;
        }
    }
}
funcionPasarDatos();
}

```

```

float funcionTemperatura()
{ /*Función para obtener la temperatura en un momento
dado(Tarda entre 701 y 750 ms)*/
    float l_temperatura;
    sensor_temperatura.requestTemperatures(); /*Por
sí mismo, este sensor tarda en darnos un valor muy cercano al
real*/

```

```

    l_temperatura = sensor_temperatura.getTempCByIn-
dex(0); /*por lo tanto no es relevante filtrar los datos*/
    return (l_temperatura);
}

byte estadoElectronivel(byte pinElectro, int muestrasElectro,
int delayElectro)
{
    /*Funcion para obtener el estado de un electronivel (0 o
1),*/

    unsigned long tiempoPrevio = millis();
    unsigned long tiempoActual;
    int i = 0;
    int cuenta = 0;

    if (muestrasElectro > 300)
    {
        muestrasElectro = 300;
    }
    if (delayElectro > 20)
    {
        delayElectro = 20;
    }

    while (i < muestrasElectro)
    {
        tiempoActual = millis();

        if ((tiempoActual - tiempoPrevio) >= delayElectro)
        {
            if (digitalRead(pinElectro) == HIGH)
            {
                cuenta++;
            }
            else
            {
                break;
            }
            i++;
            tiempoPrevio = millis();
        }
    }
    if (cuenta == muestrasElectro)
    {
        return 1;
    }
    else
    {
        return 0;
    }
}

byte estadoTurbidezDigital(byte pinTurbidez, int muestras-
Turbidez, unsigned long delayTurbidez)
{ /*Funcion para obtener el estado de un electronivel (0 o
1),*/

    unsigned long tiempoPrevio = millis();
    unsigned long tiempoActual;

```

```

int i = 0;
int cuenta = 0;

if (muestrasTurbidez > 200)
{
    muestrasTurbidez = 200;
}
if (delayTurbidez > 20)
{
    delayTurbidez = 20;
}

while (i < muestrasTurbidez)
{
    tiempoActual = millis();

    if ((tiempoActual - tiempoPrevio) >= delayTurbidez)
    {
        if (digitalRead(pinTurbidez) == HIGH)
        {
            cuenta++;
        }
        else
        {
            break;
        }
        i++;
        tiempoPrevio = millis();
    }
}
if (cuenta == muestrasTurbidez)
{
    return 1;
}
else
{
    return 0;
}
}

```

```

float funcionPH(int muestraspH, unsigned long delaypH)
//muestraspH = número de muestras,máximo 20 delaypH,
tiempo entre muestras y muestra
{
    Serial.println("c.0.1");
    unsigned long tiempoPrevio;
    unsigned long tiempoActual;
    int i = 0;
    Serial.println("c.0.2");
    if (muestraspH > 20)
    {
        muestraspH = 20;
    }
    if (delaypH > 50)
    {
        delaypH = 50;
    }
    tiempoPrevio = millis();
    Serial.println("c.0.3");

```

```

while (i <= muestraspH) //toma maximo 20 muestras
{
    Serial.println("c.0.3.4");
    tiempoActual = millis();
    if ((tiempoActual - tiempoPrevio) >= delaypH)
    {
        Serial.println("c.0.3.5");
        array_muestras_ph[i] = analogRead(pin_sen-
sor_ph);
        i++;
        tiempoPrevio = millis();
    }
}
Serial.println("c.0.4");
for (int i = 0; i < (muestraspH - 1); i++) //Ordenamos de
menor a mayor todos las muestras
{
    for (int j = i + 1; j < muestraspH; j++)
    {
        if (array_muestras_ph[i] > array_muestras_ph[j])
        {
            temporal_ph = array_muestras_ph[i];
            array_muestras_ph[i] = array_muestras_ph[j];
            array_muestras_ph[j] = temporal_ph;
        }
    }
}
valor_promedio_ph = 0;
Serial.println("c.0.5");
for (int i = int(muestraspH * 0.2); i < int(muestraspH -
(muestraspH * 0.2)); i++) //Se promedian los valores de en
medio(el 60%)
    valor_promedio_ph += array_muestras_ph[i];
float valor_de_ph = (float)valor_promedio_ph * 5.0 /
1024 / 6;
valor_de_ph = 3.5 * valor_de_ph;
return valor_de_ph;
}

```

```

String funcionDatos.Json()
{
    String Datos.Json = "{\"temperatura\":\\"" +
String(d_temperatura) +
    "\",\"pH\":\\"" + String(d_pH) +
    "\",\"turbidez\":\\"" + String(d_turbidez) +
    "\",\"tds\":\\"" + String(d_tds) +
    "\",\"relay\":[\\"" + String(d_relay[0]) +
    "\",\\"" + String(d_relay[1]) +
    "\",\\""electronivel\":[\\"" + String(d_electro-
nivel[0]) +
    "\",\\"" + String(d_electronivel[1]) +
    "\",\\"" + String(d_electronivel[2]) + "\",\\""
+
    String(d_electronivel[3]) +
    "\",\"fecha\":{\\"fecha\":\\"" + funcionFe-
cha() +
    "\",\"hora\":\\"" + funcionHora() + "\",},}";
    return Datos.Json;
}

```

```

}

void funcionPasarDatos()
{
    String DatosJson = funcionDatosJson();
    sw.println(DatosJson);
    Serial.println(DatosJson);
}

String funcionFecha()
{
    RTC.read(fecha_hora);
    String l_dia = String(fecha_hora.Day);
    String l_mes = String(fecha_hora.Month);
    String l_ano = String(tmYearToCalendar(fe-
cha_hora.Year));

```

```

    String l_fecha = String(l_dia + "/" + l_mes + "/" +
l_ano);
    return l_fecha;
}

String funcionHora()
{
    RTC.read(fecha_hora);
    String l_hora = String(fecha_hora.Hour);
    String l_minuto = String(fecha_hora.Minute);
    String l_segundo = String(fecha_hora.Second);
    String l_horario = String(l_hora + ":" + l_minuto + ":"
+ l_segundo);
    return l_horario;
}

```

## 12.3. Código ESP32

```

#
include <WiFi.h>
#include <HTTPClient.h>
#include <ArduinoJson.h>
#include <FS.h>
#include <SD.h>
#include <SPI.h>
const char* ssid = "INFINITUMs5bx";
const char* password = "d8af986d35";
int r_e_nivel_1;
int r_e_nivel_2;
int r_e_nivel_3;
int r_e_nivel_4;
int r_e_nivel_5;
int r_e_nivel_6;
float r_sensor_temperatura;
float r_sensor_ph;
float r_sensor_turbidez;
float r_sensor_solidos;
const char* api_estado;
const char* api_aqi;
const char* api_url;
const char* api_name_url;
const char* api_city_name;
const char* api_contaminante_dominante;
const char* api_co;
const char* api_humedad;
const char* api_no2;
const char* api_o3;
const char* api_presion_atmosferica;
const char* api_pm25;
const char* api_so2;
const char* api_temp;
const char* api_viento;
const char* api_hora;
char bfr[700];
void setup(){
    Serial.begin(115200);
    funcionConectarWifi();
    if(!SD.begin()) {
        Serial.println("Revise la tarjeta de memoria");
        return;
    }
}void loop(){
    funcionObtenerDatosApi();
    writeFile(SD, "/datos.csv", "fecha_del_sis-
tema;hora_del_sistema;estado_electronivel_1;estado_elec-
tronivel_2;estado_electronivel_3;estado_electronivel_4;
estado_electronivel_5;estado_electronivel_6;registro_pH;;;
api_estado; api_aqi;
api_url;api_name_url;pi_city_name;api_contaminante_do-
minante;api_co;api_humedad;api_no2; api_o3;api_pre-
sion_atmosfe-
rica;api_pm25;api_so2;api_temp;api_viento;api_hora");
    void funcionConectarWifi(){
        WiFi.begin(ssid, password);
        while (WiFi.status() != WL_CONNECTED)
        {
            delay(500);
            Serial.println("Connecting to WiFi.");
        }
        Serial.println("Connected to the WiFi network");
    }
}void funcionObtenerDatosApi(){
    const size_t bufferSize = JSON_ARRAY_SIZE(2) +
JSON_ARRAY_SIZE(3) +
12*JSON_OBJECT_SIZE(1) +
4*JSON_OBJECT_SIZE(2)
+ 2*JSON_OBJECT_SIZE(3) +
JSON_OBJECT_SIZE(8) + JSON_OBJECT_SIZE(11);
    DynamicJsonBuffer jsonBuffer(bufferSize);
    if ((WiFi.status() == WL_CONNECTED))
    {

```

```

    HTTPClient http;
    http.begin("http://api.waqi.info/feed/@407/?to-
ken=14d289b7792cad604062736be61ff7c42fa3ad0f");
    int httpCode = http.GET();
    if (httpCode > 0)
    {
        String datosApi = http.getString();
        JsonObject& root = jsonBuffer.parseOb-
ject(datosApi);
        if (!root.success()) {
            Serial.println("JSON parsing fai-
led!");
            return;
        }
        api_estado = root["status"];
        api_aqi = root["data"]["aqi"];
        api_url = root["data"]["attribu-
tions"][0]["url"];
        api_name_url = root["data"]["attribu-
tions"][0]["name"];
        api_city_name =
root["data"]["city"]["name"];
        api_contaminante_dominante =
root["data"]["dominentpol"];
        api_co = root["data"]["iaqi"]["co"]["v"];
        api_humedad =
root["data"]["iaqi"]["h"]["v"];
        api_no2 = root["data"]["iaqi"]["no2"]["v"];
        api_o3 = root["data"]["iaqi"]["o3"]["v"];
        api_presion_atmosferica =
root["data"]["iaqi"]["p"]["v"];
        api_pm25 =
root["data"]["iaqi"]["pm25"]["v"];
        api_so2 = root["data"]["iaqi"]["so2"]["v"];
        api_temp = root["data"]["iaqi"]["t"]["v"];
        api_viento = root["data"]["iaqi"]["w"]["v"];
        api_hora = root["data"]["time"]["s"];
        Serial.print("Estado: ");
        Serial.print(api_estado);
        Serial.print("\t");
        Serial.print("url: ");
        Serial.print(api_url);
        Serial.print("\t");
        Serial.print("Nombre url: ");
        Serial.print(api_name_url);
        Serial.print("\t");
        Serial.print("estacion: ");
        Serial.print(api_city_name);
        Serial.print("\t");
        Serial.print("contaminante dominante: ");
        Serial.print(api_contaminante_domi-
nante);

        Serial.print("\t");
        Serial.print("CO: ");
        Serial.print(api_co);
        Serial.print("\t");
        Serial.print("NO2: ");
        Serial.print(api_no2);
        Serial.print("\t");
        Serial.print("O3: ");
        Serial.print(api_o3);
        Serial.print("\t");
        Serial.print("Presion: ");
        Serial.print(api_presion_atmosferica);
        Serial.print("\t");
        Serial.print("PM25: ");
        Serial.print(api_pm25);
        Serial.print("\t");
        Serial.print("SO2: ");
        Serial.print(api_so2);
        Serial.print("\t");
        Serial.print("Temperatura: ");
        Serial.print(api_temp);
        Serial.print("\t");
        Serial.print("Viento: ");
        Serial.print(api_viento);
        Serial.print("\t");
        Serial.print("Hora: ");
        Serial.print(api_hora);
        Serial.println("");
    }
    else{
        Serial.println("Error en el requerimiento del
HTTP");
    }
    http.end();
    delay(10000);
}

void listDir(fs::FS &fs, const char * sd_dirname, uint8_t
sd_levels){
    Serial.printf("Escuchando Directorio: %s\n", sd_dir-
name);
    File sd_root = fs.open(sd_dirname);
    if(!sd_root) {
        Serial.println("Error al abrir el directorio");
        return;
    }
    if(sd_root.isDirectory()) {
        Serial.println("No es un directorio");
        return;
    }
    File file = sd_root.openNextFile();
    while(file) {
        if(file.isDirectory()) {
            Serial.print(" DIR : ");
            Serial.println(file.name());
            if(sd_levels) {
                listDir(fs, file.name(), sd_levels -1);
            }
        }
        else {
            Serial.print(" FILE: ");
            Serial.print(file.name());
            Serial.print(" SIZE: ");
            Serial.println(file.size());
        }
        file = sd_root.openNextFile();
    }
}

```

```

    }
}
void readFile(fs::FS &fs, const char * path){
    Serial.printf("Leyendo Archivo: %s\n", path);
    File file = fs.open(path);
    if(!file) {
        Serial.println("Error al abrir el archivo");
        return;
    }
    Serial.print("Read from file: ");
    while(file.available()) {
        Serial.write(file.read());
    }
    file.close();
}
void writeFile(fs::FS &fs, const char * path, const char * message){
    Serial.printf("Escribiendo Archivo: %s\n", path);
    File file = fs.open(path, FILE_WRITE);
    if(!file) {
        Serial.println("Error al abrir el archivo para escribir");
        return;
    }
    if(file.print(message)) {
        Serial.println("Archivo escrito");
    } else {
        Serial.println("Error de escritura");
    }
    file.close();
}
void appendFile(fs::FS &fs, const char * path, const char * message){
    Serial.printf("Adjuntar al archivo: %s\n", path);

```

```

    File file = fs.open(path, FILE_APPEND);
    if(!file) {
        Serial.println("Error al abrir el archivo para adjuntar");
        return;
    }
    if(file.print(message)) {
        Serial.println("Mensaje adjuntado");
    } else {
        Serial.println("Error de adjunción");
    }
    file.close();
}
void renameFile(fs::FS &fs, const char * path1, const char * path2){
    Serial.printf("Renombrando %s a %s\n", path1, path2);
    if (fs.rename(path1, path2)) {
        Serial.println("Archivo renombrado");
    } else {
        Serial.println("error al renombrar");
    }
}
void deleteFile(fs::FS &fs, const char * path){
    Serial.printf("Eliminando archivo: %s\n", path);
    if(fs.remove(path)) {
        Serial.println("Archivo eliminado");
    } else {
        Serial.println("Error de eliminación");
    }
}
void leerDatosArduinoJson(){
    Serial.readBytesUntil( '\n', bfr, 700);
}
}

```

# 13 Bibliografía

- Ahmed, W., Huygens, F., Goonetilleke, A., & Gardner, T. (2008). Real-Time PCR Detection of Pathogenic Microorganisms in Roof-Harvested Rainwater in Southeast Queensland, Australia. *Applied and environmental microbiology*, 74(17), 5490–5496.
- AliExpress. (2018a). *Turbidity Meter Tester Digital*. Obtenido de <https://es.aliexpress.com/item/Micro-Portable-Electronic-turbidity-meter-Concentration-Meter-Montior-Measurement-range-0-200NTU-Minimum-value-0-1NTU/32787836632.html?spm=a219c.10010108.1000016.1.4cc77f4fBsSMBt&isOrigTitle=true>
- AliExpress. (2018b). *High Precision WGZ-200AS Desktop Micro turbidity meter*. Obtenido de <https://es.aliexpress.com/item/High-Precision-WGZ-200AS-Desktop-Micro-turbidity-meter-Concentration-Meter-Measurement-range-100-200NTU-Minimum-value/32834160282.html?spm=a219c.10010108.1000016.1.43aa12aaCguZui&isOrigTitle=true>
- AliExpress. (2018c). *Portable Electronic turbidity meter*. Obtenido de [https://www.aliexpress.com/item/Portable-Electronic-turbidity-meter-Concentration-Meter-Montior-Measurement-range-0-20NTU-Minimum-value-0-01NTU/32787792486.html?spm=2114.search0305.3.16.2c9a9f30dilN0g&ws\\_ab\\_test=searchweb0\\_0,searchweb201602\\_0\\_10130\\_10152\\_](https://www.aliexpress.com/item/Portable-Electronic-turbidity-meter-Concentration-Meter-Montior-Measurement-range-0-20NTU-Minimum-value-0-01NTU/32787792486.html?spm=2114.search0305.3.16.2c9a9f30dilN0g&ws_ab_test=searchweb0_0,searchweb201602_0_10130_10152_)
- Amazon. (2018a). *Newdy Digital PH Meter Tester for Water Quality, Food, Aquarium, Pool & Hydroponics, 0.01 / High Accuracy +/- 0.05 and 0.00-14.00*. Obtenido de [amazon.com/Newdy-Aquarium-Hydroponics-0-00-14-00-Measurement/dp/B07217NV2Q/ref=sr\\_1\\_1?ie=UTF8&qid=1512495647&sr=8-1&keywords=Newdy](https://www.amazon.com/Newdy-Aquarium-Hydroponics-0-00-14-00-Measurement/dp/B07217NV2Q/ref=sr_1_1?ie=UTF8&qid=1512495647&sr=8-1&keywords=Newdy)
- Amazon. (2018b). *Hanna Instruments 716435 Checker pH Tester (HI 98103)*. Obtenido de <https://www.amazon.com/gp/offer-listing/B01G74C3KW/>
- Aquino Martínez, L. (2012). *Impacto de la urbanización sobre la dinámica de las tormentas en el Valle de México*. Ciudad de México: Posgrado en Ciencias de la Tierra. Instituto de Geofísica. Centro de ciencias de la atmósfera.
- ATA. (2010). *Wet systems/dry systems*. Obtenido de Tankulator: <http://tankulator.ata.org.au/siting-a-tank.php>
- Audin, A. (1979). *Lyon, miroir de Rome*. París: Fayard.
- Belmeziti, A. (2012). *Impact potentiel de l'utilisation de l'eau de pluie dans le bâtiment sur les consommations d'eau potable à l'échelle urbaine : le cas de l'agglomération parisienne*. (U. Paris-Est, Ed.) Architecture, aménagement de l'espace.
- Bertrand-Krajewski, J., Chebbo, G., & Saget, A. (1998). Distribution of Pollutant Mass vs Volume in Stormwater Discharges and the First Flush Phenomenon. *Water Resources*, 2341-2356.

- Blue Mountain Co. (29 de 11 de 2018). *Products*. Obtenido de Rain Harvesting: <https://rainharvesting.com.au/>
- Bucheli, T. D., Müller, S. R., Voegelin, A., & Schwarzenbach, R. P. (1998). Bituminous Roof Sealing Membranes as Major Sources of the Herbicide (R,S)-Mecoprop in Roof Runoff Waters: Potential Contamination of Groundwater and Surface Waters. *Environmental Science & Technology*, 32(22), 3465-3471.
- Burns, E. (2009). *Repensar la cuenca: la gestión de ciclos del agua en el valle de Mexico*. CDMX: Universidad Autónoma Metropolitana.
- Carolina. (2018). *Carolina Biological Supply Company*. Obtenido de NeuLog Turbidity Sensor: [carolina.com/science-lab-sensors-probes/neulog-turbidity-sensor-probe/369660.pr](http://carolina.com/science-lab-sensors-probes/neulog-turbidity-sensor-probe/369660.pr)
- CENAPRED. (09 de 10 de 2017). *Impacto socioeconómico de desastres de 2000 a 2015*. Recuperado el 08 de 11 de 2018, de Datos abiertos de México: <https://datos.gob.mx/busca/dataset/impacto-socioeconomico-de-desastres-de-2000-a-2015>
- CONAFOVI. (2005). *Uso eficiente del agua en desarrollos habitacionales*. Ciudad de México: CONAFOVI.
- CONAGUA. (2010). *Precipitación pluvial normal (1981-2010)*. Obtenido de Sistema Nacional de Información del Agua: <http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=precipitacion&ver=reporte&o=0&n=eatal>
- Consejo Nacional de investigación. (1995). *El agua y la ciudad de México*. Ciudad de México: Academia de la investigación científica.
- Dallas Semiconductor. (2008). *Maxim integrated*. Obtenido de DS1307: <https://cdn.sparkfun.com/datasheets/BreakoutBoards/DS1307.pdf>
- Davis, S. N., & DeWiest, R. J. (1966). *Hydrogeology*. Michigan: John Wiley & Sons.
- Deletic, A. (1998). The First Flush Load of Urban Surface Runoff. *Water Resources*, 2462-2470.
- DFRobot. (2018a). *Gravity: Analog Electrical Conductivity Sensor / Meter(K=10)*. Obtenido de <https://www.dfrobot.com/product-1797.html>
- DFRobot. (2018b). *Industrial pH Electrode - Armor Casing*. Obtenido de <https://www.dfrobot.com/product-1074.html>
- DFRobot. (2018c). *Gravity: Analog pH Sensor / Meter Pro Kit For Arduino*. Obtenido de Gravity: Analog pH Sensor / Meter Pro Kit For Arduino
- DFRobot. (2018d). *Gravity: Analog Turbidity Sensor For Arduino*. Obtenido de <https://www.dfrobot.com/product-1394.html>
- DFRobot. (2018e). *Waterproof DS18B20 Digital Temperature Sensor for Arduino*. Obtenido de <https://www.dfrobot.com/product-689.html>
- DFRobot. (2018f). *Gravity: Digital 10A Relay Module*. Obtenido de <https://www.dfrobot.com/product-1572.html>
- Doyle, K. C. (2006). *Sizing the First Flush and its Effect on the Storage-ReliabilityYield Behavior of Rainwater Harvesting in Rwanda*. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology.

- Environment Agency(UK). (2007). *Water resources: rainwater reuse*. Obtenido de Online article from Environment Agency website: <http://www.environmentagency.gov.uk/subjects/waterres/286587/28>
- EPA. (2009). *National Primary Drinking Water Regulations*.
- EPA. (2018). *Methods Approved to Analyze Drinking Water Samples to Ensure Compliance with Regulations*. Obtenido de United States Enviromental Protection Agency: <https://www.epa.gov/dwanalyticalmethods>
- FAO. (2017). Annual population. Recuperado el 27 de Diciembre de 2017, de <http://www.fao.org>: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/OA/visualize>
- Fewkes, A. (1999). Modelling the performance of rainwater collection systems: towards a generalised approach. *Building and Environment*, 323-333.
- Fewkes, A. (1999). The use of rainwater for WC flushing: the field testing. *Building and Environment, Volume 34*, 765-772.
- Fisher Scientific. (2018a). *Oakton™ PCTestr 35*. Obtenido de <fishersci.com/shop/products/oakton-pctestr-35/s98496>
- Fisher Scientific. (2018b). *Oakton™ PCTestr 35*. Obtenido de <fishersci.com/shop/products/oakton-pctestr-35/s98496>
- Fisher Scientific. (2018c). *Oakton™ PCTestr 35*. Obtenido de <https://www.fishersci.com/shop/products/oakton-pctestr-35/s98496>
- Förster, J. (1999). Variability of roof runoff quality. *Water science and technology*, 39(5), 137-144.
- Freeflush. (2018). *products*. Obtenido de freeflush: [www.freeflush.co.uk](http://www.freeflush.co.uk)
- García Velázquez, J. H. (2012). *SISTEMA DE CAPTACIÓN Y APROVECHAMIENTO PLUVIAL PARA UN ECOBARRIO DE LA CD. DE MÉXICO*. Ciudad de México: Facultad de Ingeniería.
- García Villegas, B. (2013). *Caracterización del agua de lluvia captada en una edificación para su aprovechamiento con fines de sustentabilidad hídrica*. Ciudad de México: UNAM.
- Ghisi, E., Tavares, D., & Rocha, V. (2009). Rainwater harvesting in petrol stations in Brasília: Potential for potable water savings and investment feasibility analysis. *Conservation and Recycling*, 79-85.
- Gidahatari. (13 de 08 de 2015). *¿Hay sensores de bajo coste para la medición de la calidad del agua potable?* Obtenido de iagua: <https://www.iagua.es/blogs/gidahatari/hay-sensores-coste-medicion-calidad-agua-potable>
- González Reyes, C. (2017). *Apuntes de tratamiento de agua para consumo humano*. Ciudad de México: División de Ingeniería Civil y Geomática; Departamento de Ingeniería Sanitaria y Ambiental.
- Gould, J., & Nissen-Peterson, E. (1999). *Rainwater catchment systems for domestic supply: design, construction and implementation*. Londres: Intermediate Technology Publications.
- Grainger. (2018a). *ExStick PH Meter, H2O Proof, 0.00 to 14*. Obtenido de <https://www.grainger.com/product/EXTECH-ExStick-PH-Meter-1MN58>
- Grainger. (2018b). *LCD Turbidity Meter with 0 to 50.00, 50 to 1000 NTU Turbidity Range*. Obtenido de <http://grainger.com/product/EXTECH-LCD-Turbidity-Meter-with-0-25KC71>

- Gribbin, J. E. (2017). *Introducción a la hidráulica e hidrología con aplicaciones para la administración del agua pluvial*. Ciudad de México: Cengage Learning Editores S.A de C.V.
- Haas, C. N., Meyer, M. A., & Paller, M. S. (1983). Microbial alterations in water distribution systems and their relationship to physical-chemical characteristics. *Journal of American Water Works Association*, 75(9), 475-481.
- Hach. (2018a). *Print Pocket Pro+ pH Tester with Replaceable Sensor*. Obtenido de <https://www.hach.com/pocket-pro-ph-tester-with-replaceable-sensor/product?id=17990686211&callback=qs>
- Hach. (2018b). *TSS sc Turbidity and Suspended Solids Immersion Probe, Stainless Steel*. Obtenido de [hach.com/tss-sc-suspended-solids-insitu-sensor/product?id=7640163555&callback=qs](https://www.hach.com/tss-sc-suspended-solids-insitu-sensor/product?id=7640163555&callback=qs)
- HALL, J., ZAFFIRO, A. D., MARX, R. B., KEFAUVER, P. C., KRISHNAN, E. R., HAUGHT, R. C., & HERRMANN, J. G. (2007). On-line water quality parameters as indicators of distribution system contamination. *American Water Works Association*, 99(1), 66-77.
- Haraguchi, M., & Lall, U. (2014). Flood risks and impacts: A case study of Thailand's floods in 2011 and research questions for supply chain decision making. *International Journal of Disaster Risk Reduction*.
- Health Canada. (2017). *Guidelines for Canadian Drinking Water Quality—Summary Table*. Healthy Environments and Consumer Safety Branch. Ottawa: Water and Air Quality Bureau.
- Helsel, D. R., Kim, J. I., Grizzard, T. J., Randall, C. W., & Hoehn, R. C. (1979). Land use influences on metals in storm drainage. *Water Pollution control*, 709-717.
- Hernández Santiago, V. (2018). *Tesina de especialidad: Diseño de las instalaciones para el suministro de agua de la vivienda industrializada sustentable (VIS casa UNAM) y la alternativa de captación de agua pluvial como complemento de suministro de agua*. Ciudad de México: UNAM.
- Hernández-Suárez, C. (2011). Nueva política del agua y herencias centralizadoras: el consejo de cuenca del Valle de México. *agric. soc. desarro*, 8(3), 303-327. Obtenido de [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1870-54722011000300001&lng=es&nrm=iso](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-54722011000300001&lng=es&nrm=iso)
- Hogentogler. (2018). *Ohaus Starter Conductivity Pen-C65*. Obtenido de Hogentogler: <https://www.hogentogler.com/conductivity-meters/pocket-conductivity-meters.asp>
- Ibarra, c. A. (2010). *Calidad del agua : un enfoque multidisciplinario*. Ciudad de México: UNAM, Instituto de Investigaciones Económicas.
- INEGI. (2015). *Principales resultados de la Encuesta Intercensal 2015*. Estaos Unidos Mexicanos: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- Instituto Nacional de Ecología. (2000). *Sustainable Development Indicators of Mexico*. Ciudad de México: Geografía e Informática.
- International Labour Conference. (2013). *Sustainable development, decent work and green jobs*. Ginebra: ILO. Obtenido de [http://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/---ed\\_norm/---relconf/documents/meetingdocument/wcms\\_207370.pdf](http://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/---ed_norm/---relconf/documents/meetingdocument/wcms_207370.pdf)
- Jáuregui , E. (2000). *El Clima de la Ciudad de México*. Instituto de Geografía de la UNAM y Plaza y Valdéz Editores.

- Jimenez Cisneros, B. (2001). *La contaminación ambiental en México: Causas, efectos y tecnología apropiada*. México: Limusa, Colegio de Ingenieros Ambientales de México A.C, Instituto de Ingeniería de la UNAM, FEMISCA.
- Jiménez Cisneros, B., & Asano, T. (2008). *Water Reuse: An International Survey of Current Practice, Issues and Needs. Scientific and Technical Report No. 20*. Londres: IWA Publishing.
- JoyFay. (2018). Obtenido de [https://www.joyfay.com/catalog/product/view/id/51257?gclid=EAIaIQobChMIs87u3-L41wIVBA1pCh0jHQjDEAQYAiABEgLvbd\\_BwE](https://www.joyfay.com/catalog/product/view/id/51257?gclid=EAIaIQobChMIs87u3-L41wIVBA1pCh0jHQjDEAQYAiABEgLvbd_BwE)
- Jung, C. (1977). Basic considerations about trace constituents in the atmosphere as related to the fate of global pollutants. En I. Suffert, *Fate and pollutants in the air and water environment- Part I*. Nueva York: Wiley Interscience.
- Kelly, G. (1994). Atmospheric Deposition. En V. Novotny, & O. Harvey, *Water Quality, prevention, identification and management of diffuse pollution*. Nueva York: Van Nostrand Reinhold.
- König, K. W. (2001). *The Rainwater Technology Handbook*. Alemania: Verlag Wilo GmbH.
- Lancaster, B. (2006). Guiding principles to welcome rain into your life and landscape. In: Rainwater Harvesting for Drylands and Beyond. En *Rainwater Harvesting for Drylands and Beyond*. Tucson, Arisona: Rainsource Press.
- Lee, J. Y., Yang, J.-S., Han, M., & Choia, J. (2010). Comparison of the microbiological and chemical characterization of harvested rainwater and reservoir water as alternative water resources. *Science of The Total Environment*, 408(4), 896-905.
- Lee, J., Bak, G., & Han, M. (2012). Quality of roof-harvested rainwater – comparison of different roofing materials. *Environ. Pollut*, 422–429.
- Leeden, F. v., Troise, F. L., & Todd, D. K. (1990). *The Water Encyclopedia*. Michigan: Lewis publishers.
- Legorreta, J. (2006). *El agua y la ciudad de México*. Ciudad de México: UAM.
- Li, Y., & Migliaccio, K. W. (2011). Introduction. En Y. Li, & K. W. Migliaccio, *Water Quality concepts, sampling and analyses* (págs. 1-9). Florida: Taylor & Francis Group.
- Liaw., C. H., & Tsai, Y. L. (2010). Optimum storage volume of rooftop rainwater harvesting systems for domestic use. *Journal of the American Water Resources Association*, 1707-1714.
- Likens, G. (2013). Chapter 15 - Acid Rain. En K. C. Weathers, D. L. Strayer, & G. E. Likens, *Fundamentals of Ecosystem Science* (págs. 259-264). Academic Press,. doi:<https://doi.org/10.1016/C2009-0-03622-8>
- Litaudon, J.-C. (2002). Aqua Lugdunensis. *El acueducto Romano de Gier*. (I. M. Gallo, Trad.) Recuperado el 26 de Diciembre de 2017, de [http://www.traianvs.net/pdfs/2002\\_gier\\_es.pdf](http://www.traianvs.net/pdfs/2002_gier_es.pdf)
- Liu, Z., He, C., Zhou, Y., & Wu, J. (May de 2014). How much of the world's land has been urbanized, really? *Landscape Ecology*, 29, 763–771.
- Llamas, L. (2018). *ESP32, EL “HERMANO MAYOR” DEL ESP8266 CON WIFI Y BLUETOOTH*. Obtenido de ¿QUÉ ES EL ESP32?: <https://www.luisllamas.es/esp32/>

- Maderey-R., L. E. (1980). Intensidad de la precipitación en el Valle de México. *Investigaciones geográficas* (10), 7-53. Recuperado el 2018 de Noviembre de 10, de [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0188-46111980000100001&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46111980000100001&lng=es&tlng=es)
- Magaña, V., Perez-Fernandez, J., & Méndez Pérez, M. (2003). *Diagnosis and prognosis of extreme precipitation events in the Mexico City Basin*. Geofis. Intern.
- Marley. (2018). *Downpipe Diverter*. Obtenido de Marley: <https://www.marley.co.nz/products/rainwater/rainwater-accessories/downpipe-diverter/>
- Martinson, D. B., & Thomas, T. (2005). *QUANTIFYING THE FIRST-FLUSH PHENOMENON*.
- Martinson, D. B., & Thomas, T. (2009). Quantifying the First-Flush Phenomenon: Effects of First-Flush on Water Yield and Quality. *14th International Rainwater Catchment Systems Conference*. Kuala Lumpur.
- Masters, G. M., & Ela, W. P. (2008). *Introducción a la ingeniería medioambiental*. Madrid, España: PEARSON EDUCACIÓN, S.A.
- Mendez, C., Klenzendorf, J., Afshar, B., Simmons, M., Barrett, M., Kinney, K., & Kirisits, M. (2011). The effect of roofing material on the quality of harvested rainwater. *Water Res.*, 2049-2059.
- Milwaukee. (2018). *pH600 pH Economical Pocket Tester*. Obtenido de <http://milwaukeeinst.com/site/component/content/article/40-lowcost-pocket-testers/116-products-g-low-cost-pocket-testers-g-ph600>
- Nicholson, N., Clark, S., Long, B., Spicher, J., & Steele, K. (2009). Rainwater harvesting for non-potable use in gardens: a comparison of runoff water quality from green vs. traditional roofs. *Proceedings of World Environmental and Water 2009*. Great Rivers, Kansas City, Missouri.
- Novotny, V., & Olem, H. (1994). *Water Quality, prevention, identification and management of diffuse pollution*. Nueva York: Van Nostrand Reinhold.
- OECD Studies on Water. (2011). *Benefits of Investing in Water and Sanitation: An OECD Perspective*. Paris: OCDE Publishing. Obtenido de <http://dx.doi.org/10.1787/9789264100817-en>
- OMS. (2006). *Guías para la calidad del agua potable*. Genève, Suiza: Ediciones de la OMS.
- Pacey, A., & Cullis, A. (1989). *Rainwater Harvesting: The Collection of Rainfall and Runoff in Rural Areas*. Londres, Southampton, UK: Intermediate Technologie Publications.
- Parra, M. V. (2015). *Optimizing rainwater harvesting systems in urban areas*. Barcelona: Universitat Autònoma de Barcelona.
- pighixxx.com. (2013). Obtenido de [www.pighixxx.com](http://www.pighixxx.com)
- playelek.com. (2016). *DOIT ESP32 DEVKIT V1 PINOUT*. Obtenido de <https://playelek.com/doit-esp32-devkit-v1/>
- Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas. (2016). *Informe de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo 2016*. Paris: UNESCO.
- Puyol, A. F. (2004). *Precipitación y recursos hidráulicos en México*. Ciudad de México: UAM.

- Rahman, A., Dbais, J., & Imteaz, M. (2010). Sustainability of Rainwater Harvesting Systems in Multistorey Residential Buildings. *American J. of Engineering and Applied Sciences*, 73-82.
- Ratcliffe, M. (09 de 04 de 2015). *Three Dollar EC - PPM Meter [Arduino]*. Obtenido de hackaday: <https://hackaday.io/project/7008-fly-wars-a-hackers-solution-to-world-hunger/log/24646-three-dollar-ec-ppm-meter-arduino>
- Roebuck, R. (2007). *A WHOLE LIFE COSTING APPROACH FOR RAINWATER HARVESTING SYSTEMS: An investigation into the whole life cost implications of using rainwater harvesting systems for non-potable applications in new-build developments in the UK*". Reino unido: Design and Technology University of Bradford. Obtenido de [http://sudsolutions.co.uk/phd\\_thesis.htm](http://sudsolutions.co.uk/phd_thesis.htm)
- S.M.N. (2018). *Precipitación media histórica por entidad federativa*. Obtenido de [http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/ibi\\_apps/WFServlet?IBIF\\_ex=D3\\_AGUA01\\_01&IBIC\\_user=dgeia\\_mce&IBIC\\_pass=dgeia\\_mce&NOMBREENTIDAD=\\* &NOMBRE ANIO=\\*](http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/ibi_apps/WFServlet?IBIF_ex=D3_AGUA01_01&IBIC_user=dgeia_mce&IBIC_pass=dgeia_mce&NOMBREENTIDAD=* &NOMBRE ANIO=*)
- Sadoff, C., Hall, J., Grey, D., Aerts, J., Ait-Kadi, M., Brown, C., . . . Wiberg, D. (2015). *Securing Water, Sustaining Growth: Report of the GWP/OECD Task*. Reino Unido: Universidad de Oxford.
- Sáenz, G. M. (1999). *Hidrología en la Ingeniería*. Ciudad de México: Alfaomega.
- Saget, A., Chebbo, G., & Bertrand-Krajewski, J. (1996). The First Flush in Sewer Systems. *Water Science & Technology*, 101-108.
- Sánchez, A., Cohim, E., & Kalid, R. (2015). A review on physicochemical and microbiological contamination of roof-harvested rainwater in urban areas. *Sustainability of Water Quality and Ecology*, 119–137.
- Sansalone, J. J., & Buchberger, S. G. (1997). Partitioning and First Flush of Metals in Urban Roadway Storm Water. *Journal of Environmental Engineering*, 134-143.
- Sartor, J., & Boyd, G. (1972). *Water Pollution Aspects of Street Surface Contaminants*. Environmental Protection Agency.
- SCT. (2015). ISOYETAS DE INTENSIDAD - DURACIÓN - PERIODO DE RETORNO PARA LA REPÚBLICA MEXICANA. Ciudad de México. Obtenido de <http://www.sct.gob.mx/carreteras/direccion-general-de-servicios-tecnicos/isoyetas/>
- Slade, D. (1968). *Meteorology and atomic energy*. Washington DC: U.S. Atomic energy commission.
- Sotelo, G. (1997). *Hidraulica General. Volumen 1. Fundamentos*. Ciudad de México: Limusa.
- Sparkfun. (2018a). <https://www.sparkfun.com/products/12908>. Obtenido de <https://www.sparkfun.com/products/12908>
- Sparkfun. (2018b). *pH Sensor Kit*. Obtenido de <https://www.sparkfun.com/products/10972>
- Sparkfun. (2018c). *Bi-Directional Logic Level Converter Hookup Guide*. Obtenido de <https://learn.sparkfun.com/tutorials/bi-directional-logic-level-converter-hookup-guide/all>
- SperScientific. (2018). *Turbidity Meter - 860040*. Obtenido de [https://www.sperdirect.com/turbidity-meter-234-prd1.htm#spec\\_tab](https://www.sperdirect.com/turbidity-meter-234-prd1.htm#spec_tab)
- Stahre, P., & Urbonas, B. (1990). *Stormwater Detention for Drainage, Water Quality and CSO Control*. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall'.

- Tchobanoglous, G., & Schroeder, E. (1985). *Water quality—characteristics, modeling, modification*. California: Addison-Wesley Publishing Company.
- Texas department of transportation. (2009). *Hydraulic Design Manual*. Obtenido de onlinemanuals: <http://onlinemanuals.txdot.gov/txdotmanuals/hyd/hyd.pdf>
- Toolexperts. (2018). *PH TESTER METER - DIGITAL, HANDHELD INDICATOR PH501*. Obtenido de <https://www.toolexperts.com/ph-Tester-Meter-Digital-Handheld-Meter.html>
- U.S. Solid. (2018). *Motorized Ball Valve- 3/4" Brass Electrical Ball Valve, 9-24 V AC/DC, 2 Wire Auto Return*. Obtenido de <https://ussolid.com/motorized-ball-valve-3-4-brass-electrical-ball-valve-9-24-v-ac-dc-2-wire-auto-return.html>
- USEPA. (2000). *The history of Drinking Water Treatment*. Washington, DC: Office Water.
- Válvulas Industriales S.A. (12 de 2018). *Valvula de bola*. Obtenido de Productos: [http://www.valvulasindustriales.com/products\\_pictures/bola\\_aceroinoxidable.pdf](http://www.valvulasindustriales.com/products_pictures/bola_aceroinoxidable.pdf)
- Van Metre, P. C., & Mahler, B. J. (2003). The Contribution of Particles Washed From Rooftops to Contaminant Loading to Urban Streams. *Chemosphere*, 52(10), 1727-1741.
- Vázquez, A. (2000). *Caracterización Objetiva de los Nortes del Golfo de México y su Variabilidad Interanual*. Facultad de Ciencias de Atmosféricas, Universidad Veracruzana.
- Vernier. (2018a). *Salinity Sensor*. Obtenido de Vernier: <https://www.vernier.com/products/sensors/sal-bta/>
- Vernier. (2018b). *Conductivity Probe*. Obtenido de Vernier: <https://www.vernier.com/products/sensors/conductivity-probes/con-bta/>
- Vernier. (2018c). *Go Direct® pH Sensor*. Obtenido de <https://www.vernier.com/products/sensors/ph-sensors/gdx-ph/>
- Vernier. (2018c). *Turbidity Sensor*. Obtenido de <http://vernier.com/products/sensors/trb-bta/>
- Wanielista, M. P., & Yousef, Y. A. (1993). *Stormwater Management*. Wiley-Interscience.
- Wikipedia. (2018). *Atmega328*. Obtenido de <https://es.wikipedia.org/wiki/Atmega328>
- Woods-Ballard, B., & Malcolm, M. (2003). *Whole Life Costing for sustainable drainage schemes*.
- Yang, Y. J., Haught, R. C., & Goodrich, J. A. (2009). Real-time contaminant detection and classification in a drinking water pipe using conventional water quality sensors: Techniques and experimental results. *Journal of Environmental Management*, 90, 2494–2506.
- Yaziz, M., Gunting, H., Sapari, N., & Ghazali, A. (1989). Variations in rainwater quality from roof catchments. *Water Res*, 761-765.
- Zobrist, J., Müller, S., Ammann, A., Bucheli, T., Mottier, V., Ochs, M., . . . Boller, M. (2000). Quality of roof runoff for groundwater infiltration. *34*(5), 1455-1462.