



**UNIVERSIDAD
DEL AZUAY**

**UNIVERSIDAD DEL AZUAY
FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL Y GERENCIA EN
CONSTRUCCIONES**

**“Aplicación de humedales artificiales verticales para tratamiento de aguas
residuales en Cuenca”**

**TRABAJO DE GRADUACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE:
INGENIERO CIVIL CON ÉNFASIS EN GERENCIA DE
CONSTRUCCIONES**

**AUTORES:
DEYRA MARCELA BARRETO MENDIETA
MATEO JOSUÉ CHICA TAPIA**

**DIRECTOR:
MARÍA BELÉN ARÉVALO DURAZNO**

CUENCA, ECUADOR

2021

DEDICATORIA

A Dios quien me ha brindado salud y las herramientas necesarias para culminar este objetivo.

A mis padres Boris y Patricia, quienes han sido mi apoyo, fortaleza y guía. Con amor esta meta cumplida les pertenece.

A mis hermanos Boris y Nicolas por inspirarme e impulsarme a superarme cada día.

A mis amigos que hicieron de la universidad los mejores años y me brindaron alegría en cada paso.

Deyra Barreto Mendieta.

AGRADECIMIENTO

Primero, agradezco a Dios por la vida y la bendición de permitirme estar aquí, a mi familia y en especial a mis padres por brindarme su apoyo, soporte y guía en este camino.

A nuestra tutora de tesis, la ingeniería María Belén Arévalo, quien siempre supo guiarnos con gran cariño y dedicación, a la ingeniera Andrea Narváez y al ingeniero Jorge García por su apoyo, paciencia y conocimiento.

A nuestro tribunal, los Ingenieros Josué Larriva y Javier Fernández de Córdova quienes pusieron a disposición su tiempo.

Deyra Barreto Mendieta.

AGRADECIMIENTO

Expreso mi gratitud hacia todos los docentes de la Universidad del Azuay que contribuyeron en mi formación como próximo Ingeniero Civil, en especial a los que me supieron exigir, porque, gracias a las dificultades es que he logrado auto superarme. También agradezco a la Ing. Belén Arévalo, Ing Jorge García, Ing Andrea Narváez y mi compañera Deyra Barreto por formar parte de la presente investigación y finalizar con éxito.

Mateo Chica Tapia.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTO.....	iii
AGRADECIMIENTO.....	iv
ÍNDICE DE CONTENIDOS	v
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
ÍNDICE DE TABLAS	viii
ÍNDICE DE ANEXOS.....	viii
RESUMEN.....	ix
ABSTRACT	x
INTRODUCCIÓN	1
Objetivos.....	2
Objetivo General.....	2
Objetivos Específicos.....	3
1. CAPÍTULO.....	4
GENERALIDADES DE LAS AGUAS RESIDUALES.....	4
1.1. Definición de aguas residuales.....	4
1.2. Composición del agua residual.....	4
1.3. Principales características de las aguas residuales	4
1.3.1. Parámetros físicos	5
1.3.2. Parámetros químicos.....	6
1.3.3. Parámetros biológicos	7
1.4. Criterios de calidad de agua para consumo humano y uso doméstico	7
1.5. Normas de descarga de efluentes.....	8
1.6. Tratamiento de las aguas residuales.....	9
1.7. Métodos para tratar el agua residual	10
1.7.1. Humedales	10
1.7.2. Clasificación	11
1.8. Generación de biomasa en los humedales	14
1.9. Características de las cargas hidráulica y orgánica.....	15
2. CAPÍTULO.....	16
METODOLOGÍA	16
2.1. Generalidades del área de estudio	16

2.2.	Descripción del diseño de los pilotos.....	17
2.3.	Descripción de la operación de los pilotos.....	19
2.4.	Plan de monitoreo	21
2.4.1.	Eficiencia de remoción de la materia orgánica y sólidos.....	24
2.4.2.	Evaluación de hidrogramas de salida del humedal	25
2.5.	Tamaño de la muestra	27
3.	CAPÍTULO.....	29
	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	29
3.1	Cargas hidráulicas y orgánicas aplicadas	29
3.2.	Características de la biomasa en los humedales	31
3.3	Remoción de la materia orgánica.....	33
3.4	Remoción de sólidos suspendidos.....	38
3.4.1.	Muestras puntuales SST	38
3.3.	Evaluación de hidrogramas de salida.....	41
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	43
	BIBLIOGRAFÍA	45
	ANEXOS.....	48

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Ubicación de los Humedales Artificiales pilotos	16
Figura 2 Sistema construido de humedales tipo francés.....	17
Figura 3 Tanque de almacenamiento (1).....	18
Figura 4 Tanques de descarga, al lado izquierdo se muestra el tanque de descarga 2 y del lado derecho el tanque de descarga 3.....	18
Figura 5 Esquema de la estación experimental de aguas residuales sin escala.....	19
Figura 6: Adaptación de Lolium Perenne en el humedal 1.....	19
Figura 7 Controlador Lógico Programable.....	20
Figura 8 Sistema de distribución de humedales.....	20
Figura 9: Esquema general del proceso experimental en los humedales.....	21
Figura 10 Llaves para alimentar los humedales.....	22
Figura 11 Programador sistemático ISCO.....	23
Figura 13 Muestra de agua residual cruda.....	23
Figura 14 Uso de la probeta para tomar las muestras.....	24
Figura 15 Muestra compuesta para ser analizada 100 ml de cada botella.....	24
Figura 16: Tiempo de llenado de un recipiente de 3.8 lt	26
Figura 17: Tiempo muerto del vaciado del recipiente.....	26
Figura 18 Muestras puntuales cada minuto y medio.....	26
Figura 19 Composición de la muestra.....	27
Figura 20 Punto de caída del afluente	32
Figura 21: Generación de lodos en la superficie Fuente: Autor propio.....	32
Figura 22: Ausencia de lodo en la esquina del humedal 1	32
Figura 23: Presencia de zonas muertas en las esquinas del humedal 2.....	33
Figura 21: Figura 24: Presencia de zonas muertas en los laterales del humedal 2.....	33
Figura 25: Concentraciones de DQO para afluentes y efluentes en H1 y H2.....	34
Figura 26: Eficiencia de remoción de DQO	35
Figura 27: Porcentaje de datos de DQO, que cumplen con la norma Tulsma	36
Figura 28: Concentraciones de DBO para afluentes y efluentes en H1 y H2.	36
Figura 29: Eficiencia de remoción de DBO	37
Figura 30: Porcentaje de datos de DBO, que cumplen con la norma Tulsma.	38
Figura 31: Concentraciones de SST para afluentes y efluentes en H1 y H2.	38
Figura 32: Eficiencia de remoción de SST	39

Figura 33: Porcentaje de datos de SST, que cumplen con la norma Tulsma.	40
Figura 34: Hidrogramas de efluentes	41

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Límites de descarga para efluentes basados en la norma Tulsma.	8
Tabla 2: Cantidad de muestras registradas	27
Tabla 3 Características de calidad del afluente.....	30
Tabla 4 Características de la carga de masa superficial	31

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Calendario de toma de muestras	48
Anexo 2. Hidrograma de Caudales y volúmenes acumulados.....	53

“APLICACIÓN DE HUMEDALES ARTIFICIALES VERTICALES PARA TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN CUENCA”

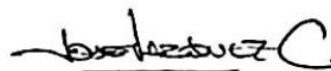
RESUMEN

La presente investigación permite conocer el funcionamiento de humedales de FSV en ambientes templados. El objetivo de este estudio es establecer la eficiencia de los humedales y verificar su correcto funcionamiento. En este estudio se realizó el método volumétrico y toma de muestras para evaluaciones físico químico de DBO, DQO y SST. Los resultados indicaron que la hidráulica del sistema es eficiente, existe una generación de biomasa que favorece el tratamiento y los SST presentan mayor porcentaje de remoción. El sistema es adecuado para el tratamiento de aguas residuales, el tiempo de retención hidráulica es apto para alcanzar la eficiencia requerida.

Palabras clave: Humedales, biomasa, agua residual



Ing. María Belén Arévalo Durazno
Directora del Trabajo de Titulación



Ing. José Fernando Vásquez Calero
Director de Escuela



Deyra Marcela Barreto Mendieta



Mateo Josué Chica Tapia

Autores

" VERTICAL ARTIFICIAL WETLANDS' APPLICATION FOR WASTEWATER TREATMENT IN CUENCA"

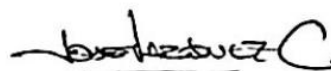
ABSTRACT

This research introduces FSV wetlands' functioning in temperate environments. The objective of the study was to establish the efficiency of wetlands and verify their correct operation. In this study, we used the volumetric method and sampling for physical-chemical evaluations of BOD, COD and TSS. The results showed that the system's hydraulics was efficient. Also, it was evidenced that there was a generation of biomass which is good for the treatment. Finally, the TSS present a higher percentage of removal. The system was appropriate for wastewater treatment. The hydraulic retention time was suitable to achieve the required efficiency.

Keywords: Wetlands, biomass, wastewater



Ing. María Belén Arévalo Durazno
Directora del Trabajo de Titulación



Ing. José Fernando Vásquez Calero
Director de Escuela



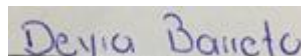
Deyra Barreto
Deyra Marcela Barreto Mendieta



Mateo Josué Chica Tapia

Authors

Translated by



Deyra Barreto



Mateo Chica

INTRODUCCIÓN

Históricamente, los humedales artificiales han sido utilizados hace aproximadamente 350 millones de años de forma natural para la conservación de combustibles fósiles (Llagas Chafloque & Guadalupe Gómez, 2006). Para la depuración de aguas contaminadas, la tendencia en los años 70, era la construcción de sistemas convencionales de hormigón y acero (Pérez et al., 2017); con costos que representan gastos significativos, lo que ha motivado a la implementación de sistemas alternativos que son atractivos por su bajo consumo de energía y menor costo de mano de obra.

La implementación de humedales artificiales se ha incrementado en los últimos veinte años, al ser una alternativa eficiente para sistemas de saneamiento de aguas servidas, y hoy por hoy, son descritos como riñones del medio ambiente, por las funciones que realizan en los ciclos hidrológicos, remoción de materia orgánica, retención de partículas tóxicas y la gran cantidad de diversidad biológica que presentan (Arias & Brix, 2003; Llagas Chafloque & Guadalupe Gómez, 2006).

Los humedales artificiales son zonas de transición que presentan gran cantidad de vegetación y, en donde el agua fluye por el lecho, asimilando una gran cantidad de materiales químicos y físicos, que, a su vez, son transformados y transportados gracias a la vegetación. Los humedales de flujo vertical, llamados franceses, son capaces de realizar un tratamiento integrado de lodos y aguas residuales, de esta forma, se disminuyen los costos de construcción debido a que no se requiere un tratamiento primario de las aguas residuales.

En Cuenca, el 90% de aguas residuales del área urbana está cubierta por el sistema de estanques de estabilización de desechos de Ucubamba, mientras que en las zonas rurales existen 32 plantas pequeñas de tratamiento descentralizadas, sin embargo, después de su puesta en marcha, son pocos los sistemas que han seguido funcionando (Alvarado et al.,

2017). En cuanto al uso de humedales artificiales de flujo subsuperficial vertical, no se ha destacado ningún sistema que haya sido implementado para tratar aguas residuales de forma directa, sino más bien, han sido utilizados como tratamientos secundarios de los efluentes.

Debido a que la mayor parte de aguas residuales en la zona urbana ya tiene un sistema de tratamiento efectivo, es importante centrarse en las zonas rurales, en donde la mayor parte de los sistemas usados no siguen en funcionamiento, en consecuencia, se busca implementar el uso de humedales artificiales de flujo subsuperficial vertical de tipo Francés, como alternativa a los sistemas anteriormente expuesto, en busca de tratamientos eficientes, que no requieren mantenimiento constante, ni mucha mano de obra, además de que permitan abaratar costos y cumplir con los objetivos de planes maestros de saneamiento para la cobertura rural de la ciudad de Cuenca.

El objetivo principal de este estudio es establecer la eficiencia de los humedales a través de la determinación de porcentajes de eliminación de materia orgánica y SST presentes en el agua residual y verificar el correcto funcionamiento de los humedales pilotos de flujo subsuperficial vertical estilo francés modificado.

Para determinar la eficiencia de los humedales, se realizó investigación en campo, la cual consistió en la toma de muestras puntuales y compuestas a la entrada y salida de las unidades y se evaluó parámetros físico químico de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), Demanda Química de Oxígeno (DQO) y Sólidos Suspendidos Totales (SST). Para el análisis hidráulico, se midieron caudales mediante el método volumétrico y se determinaron hidrogramas de salida y los puntos más representativos de éstos.

Objetivos

Objetivo General

Investigar el comportamiento de los humedales artificiales de flujo vertical estilo francés como una opción adecuada para el tratamiento de aguas residuales en la región andina (2500 m.s.n.m).

Objetivos Específicos

1. Establecer las condiciones adecuadas de trabajo de los humedales artificiales de flujo vertical tipo Francés (VFCW) para una eficiente remoción de materia orgánica y de sólidos suspendidos totales.
2. Determinar el porcentaje de remoción DBO, DQO y SST en los humedales.
3. Determinar los hidrogramas de salida.
4. Determinar la factibilidad del uso de humedales para tratamiento de aguas residuales en zonas rurales.

1. CAPÍTULO

GENERALIDADES DE LAS AGUAS RESIDUALES

1.1. Definición de aguas residuales

Se define como agua residual al agua cuya composición ha sido alterada en sus propiedades: físicas, químicas o biológicas, debido a la introducción de sustancias extrañas, y, por tanto, la modificación de su calidad original. Existen diferentes fuentes generadoras de aguas residuales, entre las cuales se destacan: doméstica, industrial, agrícola, comercial, pecuaria, y, en general, de cualquier uso que haya provocado variaciones en su composición inicial (Amoatey & Bani, 2016; Ministerio del Ambiente, 2003; Spon, 1997).

1.2. Composición del agua residual

La composición del agua residual está en función del uso para la cual fue sometida. El agua residual de origen doméstico, contiene 99.9% de agua, mientras que el 0.1% restante incluye sólidos suspendidos orgánicos e inorgánicos, que, junto con microorganismos existentes, contaminan el agua (Von Sperling, 2015). Además, la composición del agua residual varía con el clima, la situación económica, social y los hábitos de la población.

1.3. Principales características de las aguas residuales

Las características de las aguas residuales dependen principalmente de su fuente generadora. Por un lado, la existencia de sistemas de alcantarillado separado, en donde, el agua de lluvia es transportada en una tubería independiente al del agua residual, en este caso, el agua lluvia no contribuye para el tratamiento de aguas residuales en las plantas. Por otra parte, el uso de alcantarillado combinado permite la descarga conjunta de aguas residuales domésticas y aguas pluviales, es decir, se debe considerar este factor para que el tratamiento de las aguas sea eficiente (Von Sperling, 2015).

Es conveniente destacar las principales características de las aguas residuales en cuanto a sus propiedades: físicas, químicas y biológicas.

1.3.1. Parámetros físicos

- Temperatura: mayores temperaturas en las aguas residuales fomentan principalmente solubilidad de las sustancias, aumento de los sólidos, disminución de gases y la viscosidad de los líquidos. Además, los microorganismos son capaces de aumentar su actividad al doble cada diez grados, sin embargo, cuando sobrepasa cierto límite de temperatura, puede ser letal para los mismos, las aguas residuales presentan una temperatura levemente más elevada que el agua potable (Von Sperling, 2015; Jiménez, 2000).
- Color: dependen principalmente del origen y tipo de agua residual que se presente; para las aguas residuales que se han formado recientemente, el color se caracteriza por presentar un tono ligeramente gris, mientras que para las aguas residuales que han pasado a la etapa de consumo de oxígeno y realización de procesos de descomposición, su color se ve caracterizado por ser gris oscuro tendiendo a negro (Von Sperling, 2015).
- Olor: producido por sustancias volátiles o gaseosas, generalmente se deben a la descomposición que se genera de materia orgánica o a los productos químicos que se han utilizado o en su defecto producido en las aguas residuales (Jiménez, 2000). Puede variar según el tiempo de producida el agua residual, cuando son recién formadas, el olor se presenta aceitoso desagradable, una vez que el sulfuro de hidrógeno y otros subproductos comienzan a descomponerse, el olor se vuelve pestilente (Von Sperling, 2015).
- Conductividad eléctrica. - debido a que el agua pura tiene comportamiento de aislante eléctrico, a través de este parámetro es posible conocer el contenido de sal que se encuentra en el agua, ya que esta es capaz de proporcionarle la capacidad de conducir corriente eléctrica (Jiménez, 2000; Amoatey & Bani, 2016).

- Sólidos disueltos totales. - está formado por materia orgánica y sales disueltas inorgánicas en el agua (Von Sperling, 2015).
- Sólidos suspendidos. - es el causante de la turbiedad del agua, comprende partículas suspendidas, pero, que no se encuentran disueltas (Amoatey & Bani, 2016).
- Sólidos sedimentables. – es una medida de la cantidad de lodos que se generarán en la decantación primaria. Además, por su característica de dispersión de la luz, capaz de traspasar la muestra de agua, genera turbidez (Jiménez, 2000).

1.3.2. Parámetros químicos

Las impurezas por características químicas pueden ser orgánicas, las cuales realizan degradación biológica y en consecuencia la disminución de oxígeno, e inorgánicas, que tienen la cualidad de intoxicar el agua (Raffo L & Ruiz L, 2014).

- Oxígeno disuelto (OD). – indica el porcentaje de oxígeno que se presenta en el agua y, en consecuencia, es un indicativo de su calidad (Amoatey & Bani, 2016).
- Demanda bioquímica de oxígeno (DBO). – representa la cantidad de oxígeno necesario para que los microorganismos aerobios puedan realizar procesos de oxidación metabólica de la materia orgánica presente en una muestra de agua (Raffo L & Ruiz L, 2014). En consecuencia, indica la cantidad de materia orgánica biodegradable presente en la muestra (Jiménez, 2000).
- DBO5. – es una muestra que se determina a los cinco días y permite conocer la cantidad de carbono orgánico biodegradable que existe en la muestra. Se realiza en condiciones estándar de temperatura y es una variación del OD (Jiménez, 2000).
- Demanda química de oxígeno (DQO). – indica la cantidad de oxígeno susceptible a oxidación para la estabilización química de la materia orgánica (Von Sperling, 2015).

Debido a que no se puede biooxidar toda la materia químicamente oxidable, el valor de la DQO siempre será mayor que el de la DBO5. Por lo tanto, se deduce que, si $DBO5/DQO < 0.5$, el efluente es de fácil descomposición, por otro lado, si el producto es menor que 0.2, significa que será difícilmente biodegradable (Jiménez, 2000).

- Compuesto orgánico total (COT). - medida directa de la cantidad de materia orgánica carbonácea presente en el agua, se determina por la conversión de carbono orgánico en dióxido de carbono (Amoatey & Bani, 2016).
- NH_4-N y NO_3-N . – productos del proceso de oxidación del amoníaco, indica la cantidad de nitrógeno disuelto en el agua (Amoatey & Bani, 2016).
- Nitrógeno total de Kjeldahl. – es una medida de: nitrógeno orgánico, amoníaco, nitrito y nitrato, considerados como nutrientes esenciales para el crecimiento de los microorganismos para el tratamiento de las aguas residuales (Von Sperling, 2015).

1.3.3. Parámetros biológicos

Los contaminantes biológicos, dan como resultado la degradación de: sustancias orgánicas, inorgánicas y microorganismos (Raffo L & Ruiz L, 2014).

- Coliformes fecales. – es un indicador de contaminación de agua con materia fecal. El principal indicador está representado por bacterias (*E. coli*) (Amoatey & Bani, 2016).
- Coliformes totales. – incluye, tanto coliformes fecales como microorganismos presentes en el suelo, sirve como un indicador de posible contaminación del agua (Amoatey & Bani, 2016).

1.4. Criterios de calidad de agua para consumo humano y uso doméstico

El uso de agua para los seres vivos es esencial desde su concepción, sin embargo, este líquido vital necesita cumplir ciertas características en su composición tanto para

consumo, bebida, y preparación de alimentos, como para satisfacer las necesidades individuales o colectivas de cada persona.

Basados en el Texto Unificado De Legislación Secundaria De Medio Ambiente, TULSMA, se indica que el agua para consumo humano y uso doméstico debe cumplir principalmente:

- Demanda Bioquímica de Oxígeno con un límite máximo permisible de 2 mg/l.
- Coliformes Fecales en un total de 600 nmp/ 100 ml.
- Coliformes totales con un límite máximo de 3000 nmp/ 100 ml.
- Oxígeno Disuelto, no menor al 80% de oxígeno de saturación y no menor a 6 mg/l.
- Sólidos disueltos totales no mayor a 1000 mg/l (Ministerio del Ambiente, 2003).

1.5. Normas de descarga de efluentes

Con la finalidad de promover el desarrollo sostenible en el Ecuador, se establece una norma de calidad Ambiental (TULSMA), en donde, se estandariza varias condiciones ambientales y una de ellas se enfoca en minimizar los impactos ambientales, relacionado con la descarga de efluentes (agua residual) hacia un cuerpo receptor. Por lo que, se presentan límites permisibles de parámetros físicos-químicos que caracterizan la calidad del agua de los sistemas de alcantarillado, sobre todo para actividades industriales o productivas, como también se debe cumplir los límites en la calidad del agua tratada.

Para la descarga de efluentes, en términos de: Demanda Química de Oxígeno (DQO), Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) y Sólidos Suspendidos Totales (SST), se debe cumplir los términos de la norma que se indica en la tabla 1, para descargas al sistema de alcantarillado y a un cuerpo de agua dulce.

Tabla 1: Límites de descarga para efluentes basados en la norma Tulsma.

Fuente: Elaboración propia

Límites de descarga al sistema de alcantarillado			
Parámetros	Expresado como	Unidad	Límite máximo permisible
Demanda Química de Oxígeno	DQO	mg/L	500

Demanda Bioquímica de Oxígeno	DBO	mg/L	250
Sólidos Suspendidos Totales	SST	mg/L	220
Límites de descarga a un cuerpo de agua dulce			
Demanda Química de Oxígeno	DQO	mg/L	250
Demanda Bioquímica de Oxígeno	DBO	mg/L	100
Sólidos Suspendidos Totales	SST	mg/L	100

1.6.Tratamiento de las aguas residuales

Actualmente, gran parte de la población cuenta con el servicio de tratamiento de aguas residuales, el cual se realiza mediante el transporte de las mismas a través de un sistema de alcantarillado hacia la planta de tratamiento o el lugar de disposición final. Sin embargo, este servicio es considerado como una implementación reciente.

En un principio, no existían tratamientos de aguas residuales como tal; se realizaban descargas de las aguas en la superficie de los terrenos, sin embargo, estas superficies no fueron suficientes para abastecer la creciente demanda de caudales generados por la aguas residuales (Ricardo, 2002).

Para el siglo XIX, con la implementación de los inodoros, se acrecentó el volumen de los desechos en los terrenos, en consecuencia, se desplegaron enfermedades y contaminación de los cuerpos de agua, por tal motivo, se vio la necesidades de transportar dichos desechos a través de un sistema de alcantarillado y se implementó el uso de drenaje (Amoatey & Bani, 2016).

El origen del tratamiento de las aguas residuales se remonta a 1800, en la época de la higiene, desde entonces se han implementado nuevos y diferentes métodos para evitar problemas de contaminación de cuerpos de agua y las enfermedades que conllevan; de este modo, se han investigado métodos como: *precipitación química, digestión de fangos, filtración intermitente en arena, filtración en lechos de contacto, aeración de aguas residuales y finalmente en 1912 se desarrolló el proceso de lodos activados* (Ricardo, 2002, p.3).

1.7.Métodos para tratar el agua residual

En la actualidad, existen dos grandes grupos de tratamiento de aguas residuales: operaciones unitarias, las cuales están en función de la aplicación de los principios físicos, y procesos unitarios, que trata principalmente con la actividad de procesos químicos o biológicos (Ricardo, 2002).

Para tratar el agua residual, el procedimiento primario comprende la sedimentación de desechos sólidos presentes en el agua, seguido por un proceso de filtrado que separa el agua más fresca de los contaminantes.

El tratamiento secundario implica la técnica de lodos, filtros percoladores, zanjas de oxidación y contactores biológicos rotativos. La unión de estos procesos se usa en aguas residuales con alto contenido de materia orgánica. Por otro lado, en el área de lodos, microorganismos como bacterias y protozoos, se mezclan con el lodo para depurar el agua de los residuos orgánicos mediante actividad metabólica natural.

Por último, en el tratamiento final se suprimen fosfatos y nitratos por medio de filtración de arena o carbón activado y se descontamina el agua con la aplicación de cloro o con compuestos semejantes (Kalfa et al., 2020).

1.7.1. Humedales

En la historia, la aplicación de humedales se ha empleado como depósitos de lodos y agua residual debido a la eficiencia en la degradación ambiental a través de la saturación de nutrientes. El científico alemán Dr. Seidel fue el pionero en realizar experimentos de aplicación en plantas de humedales para tratamiento de aguas residuales en 1952, en el Max Planck Institute de Alemania (Seidel, 1965). En la década de los 1990, la construcción de humedales se incrementó para tratar diferentes tipos de aguas residuales como las industriales y las pluviales (Heike Hoffmann, Christoph Platzer, Martina Winker, 2011).

En las civilizaciones antiguas la principal preocupación era disolver el agua residual hacia los lagos y ríos sin tomar en cuenta la necesidad de depurar las aguas servidas, sin

embargo, se aprovechó de las zonas inundadas o saturadas con la existencia de plantas adaptadas, de esta manera, se emplearon los humedales para el control de aguas contaminadas. Como resultado la contaminación del agua se redujo previo a mezclarse con los cauces (IWA, 2000).

1.7.1.1. Definición de humedales

Son sistemas de ingeniería diseñados para tratar de forma natural los diferentes tipos de agua contaminada. Los humedales son aplicados para optimizar los procesos de tratamiento, son amigables con el medio ambiente, tienen bajos costos de operación y mantenimiento en comparación con otros sistemas de tratamiento. Además, se caracterizan por tratar eficazmente las aguas residuales (Dtro et al., 2017) debido a que su tratamiento está en función del uso de: vegetación, suelo y acción de los microorganismos (Hernández-Ruiz et al., 2012).

1.7.2. Clasificación

Los humedales se clasifican en función de la circulación del agua; en sistemas de flujo subsuperficial y flujo superficial.

Los humedales de flujo subsuperficial se subdividen dependiendo el flujo de agua, humedales de flujo horizontal (FH) y de flujo vertical (FV), estos se usan para tratamiento secundario de agua residual.

Por un lado, en los humedales de flujo horizontal (FH) el agua se dispensa en un apartado del lecho, posteriormente, se traslada de forma horizontal por un medio granular y por las raíces de plantas. Finalmente, el agua tratada circula en el fondo del lecho a través de tuberías, para facilitar el movimiento de agua deben construirse con una ligera pendiente en el fondo (Arias & Brix, 2003).

Los humedales de FH están conformados por elementos como: estructuras de ingreso del afluente, impermeabilización en el fondo y laterales, medio granular, vegetación típica y estructuras de salida en donde se regula el nivel de agua (Serrano & Corzo Hernández, 2008). El principal problema que muestran estos humedales es que la nitrificación se

presenta a bajos niveles, debido a que el oxígeno suministrado por las plantas no es lo suficientemente veloz como lo exigen las cargas orgánicas (Hernández-Ruiz et al., 2012).

Los humedales de FV cuentan con un sistema de llenado, reacción y vertido; en contraste a los humedales de FH, son capaces de operar con mayores caudales, y, debido a la interacción del sistema de funcionamiento de los HFV y el drenaje vertical en el hecho, es posible que los efluentes tengan mayores grados de oxigenación por la rápida generación de reacciones aeróbicas (Hernández-Ruiz et al., 2012).

Además, existen una clasificación dentro de los humedales de FV, en la cual se incluyen los llamados humedales de FV Franceses para el tratamiento de agua residual cruda, los cuales ofrecen tratamiento integrado de lodos y aguas residuales en un solo sistema, por lo que, economizan la el costo de construcción porque no necesitan de un tratamiento primario (Dostro et al., 2017).

Generalmente los sistemas verticales se combinan con los horizontales funcionando de manera progresiva con el objetivo de eliminar el nitrógeno. El agua fluye de manera vertical, de tal forma que el medio granular no está permanentemente saturado, por lo tanto, necesitan de menor superficie para tratar las cargas orgánicas. Los humedales de FV están conformados por elementos similares a los humedales de FH (Serrano & Corzo Hernández, 2008).

Los humedales de flujo superficial son sistemas compactos de vegetación, en donde el agua fluye por arriba del lecho del sistema. Generalmente se utilizan para el tratamiento terciario de agua residual (Dostro et al., 2017). El agua circula entre los tallos de las plantas y está en contacto directo con la atmósfera. Este tipo de sistema tiene la capacidad de acoger diferentes especies de anfibios (Delgadillo et al., 2010).

En conclusión, los sistemas de flujo subsuperficial presentan una gran velocidad de remoción de materia orgánica, debido a que tienen mayores áreas superficiales para el crecimiento de microorganismos (Hernández-Ruiz et al., 2012).

1.7.2.1. Humedales artificiales de flujo subsuperficial vertical tipo Francés

La característica fundamental de los humedales Franceses (FV), es que representa un sistema eficiente, debido a que recepta agua residual sin previo tratamiento; en la primera etapa admite un tratamiento de lodos más simple en comparación al tratamiento primario en un tanque de sedimentación.

El diseño del sistema es empírico, lo que evita un diseño conceptual deficiente, por otra parte, el dimensionamiento de los filtros de lecho se basa en una carga orgánica admisible expresada como unidad de la superficie del filtro por persona equivalente.

Es importante destacar que el tiempo de alimentación para el sistema de humedales artificiales de tipo francés que recomienda la literatura es de tres a cuatro días, con el doble de días de descanso (P Molle et al., 2005), entendiéndose como alimentación al proceso en el cual, cada filtro recibe aguas residuales crudas. Las fases de alimentación y reposo son esenciales para el crecimiento de biomasa en el medio filtrante, de esta forma, es posible mantener las condiciones aeróbicas dentro del lecho filtrante y mineralizar la materia orgánica resultante de los sólidos suspendidos, contenidos en las aguas residuales sin tratar (Molle et al., 2005).

1.7.2.2. Tipo de vegetación para humedales artificiales

Entre los componentes más importantes de los humedales artificiales están las plantas, las cuales cumplen funciones de: simbiosis con los microorganismos presentes en las aguas residuales, absorción de nutrientes, proveen oxígeno y además, son un filtro de partículas (Romero et al., 2009).

Entre las plantas existentes para tratar aguas residuales, se pueden presentar diferentes especies y rutinas de enraizamiento, dependiendo de la especie de planta que se use va a variar la capacidad de remoción de: patógenos del agua, cantidad de metales pesados presentes, y elementos particulados (Romero et al., 2009).

Las plantas comúnmente utilizadas en los humedales o macrófitas incluyen: *Totora* (*Typha latifolia* sp), *Scirpus* (*Bulrus*), *Lemna* (*lenteja de agua*), *Eichornia crassipes*

(*jacinto de agua*), *Pistia stratiotes* (*lechuga de agua*) *Hydrocotyle spp.* (*Pennywort*), *Phragmites* (*reed*) (Amoatey & Bani, 2016, p. 390).

Lolium Perenne.- es una planta gramínea terrestre, usada en humedales para tratamiento de aguas residuales, esta familia de plantas se caracteriza por ser de tallo cilíndrico, nudoso, generalmente hueco y conformado por hojas que enlazan el tallo. Su nivel de adaptación favorece su crecimiento en estaciones frías, además, es capaz de absorber altos niveles de nitrógeno y fósforo, parámetros existentes en las aguas residuales, por lo que, gozará de un mejor crecimiento siempre y cuando las concentraciones del afluente sean altas. Además, se encargan de promover la eliminación de la DQO y su cultivo es factible en periodos fríos (Ren et al., 2016), requeridos para la primera fase de operación de este sistema. En base a las características presentadas de *Lolium Perenne*, se decidió utilizar esta especie en los humedales para tratar las aguas residuales.

1.8. Generación de biomasa en los humedales

La capa de depósito juega un papel fundamental en los humedales, principalmente porque permite que el tratamiento sea eficiente.

La biomasa se forma como resultado de la infiltración de partículas sólidas en la superficie con altas concentraciones de carga orgánica a lo largo de la vida útil del humedal. Entre los beneficios que presenta esta capa orgánica están:

- Eliminación de partículas de tamaño considerable.
- Permite que el humedal conserve condiciones aeróbicas debido a que mejora el tiempo de retención del agua en el sistema, y, por lo tanto, se generan mejores condiciones en el rendimiento.
- Es el lugar donde se genera mayor actividad biológica una vez que el humedal alcanza su tiempo de madurez (P Molle, 2014).

Según Paing (2015), el rendimiento óptimo de los humedales se alcanza al año o dos de su puesta en marcha porque ya se ha generado una acumulación de lodo en la superficie.

Existe una estrecha relación entre la capa de lodos y el comportamiento hidráulico del sistema, debido a que esta permite una mejor distribución del afluente en la superficie del

filtro, por tanto, influye en la hidrodinámica de los humedales que es esencial para generar procesos de degradación (P Molle, 2014).

Sin embargo, la cantidad de carga orgánica e hidráulica aplicadas al sistema deben ser controladas, para así, mantener un equilibrio y evitar que se generen obstrucciones en las unidades, que pueden desencadenar en la disminución de *la eficiencia, robustez, fiabilidad y durabilidad* (García Zumalacarregui & Von Sperling, 2018, p.3).

1.9.Características de las cargas hidráulica y orgánica

Las cargas hidráulica y orgánica son las encargadas de mineralizar la capa de biomasa en las unidades, si no son aplicadas de forma correcta pueden generar una mala distribución de lodos, y por tanto, encharcamiento en la superficie, lo que limita la transferencia de oxígeno (García Zumalacarregui & Von Sperling, 2018).

Cabe recalcar que la carga hidráulica que se aplique al sistema es de especial importancia, ya que ayuda a la eficiencia de remoción de materia orgánica, sin embargo, las variaciones de carga pueden afectar el rendimiento de los filtros, según Dotro (1997), los aspectos hidráulicos se ven influenciados por:

- Duración de tiempo de alimentación en cada pulso
- Número de pulsos por día
- Tasa de carga hidráulica instantánea aplicada

El tiempo de retención hidráulico teórico es el que indica la relación que existe entre el volumen y el caudal, tomando en cuenta que el volumen en consideración es reducido por la presencia de vegetación y la porosidad del medio (Silva & Zamora, 2005). Esto quiere decir, que determina la duración en la que los contaminantes se transforman biológica y químicamente, al momento de estar en contacto con las plantas y microorganismos existentes en las unidades. Además, es el encargado de proporcionar las condiciones requeridas de depuración de las aguas residuales (Romero et al., 2009).

2. CAPÍTULO

METODOLOGÍA

2.1.Generalidades del área de estudio

El área en estudio se ubica en la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) en Ucubamba (figura 1) de la Empresa de Telecomunicaciones, Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de Cuenca ETAPA EP, en la ciudad de Cuenca, al sur de la sierra ecuatoriana, con una altitud de 2500 msnm y predomina una temperatura promedio anual de 14 °C. El efluente que llega a la planta proviene de un sistema de alcantarillado combinado, de agua residual y pluvial.

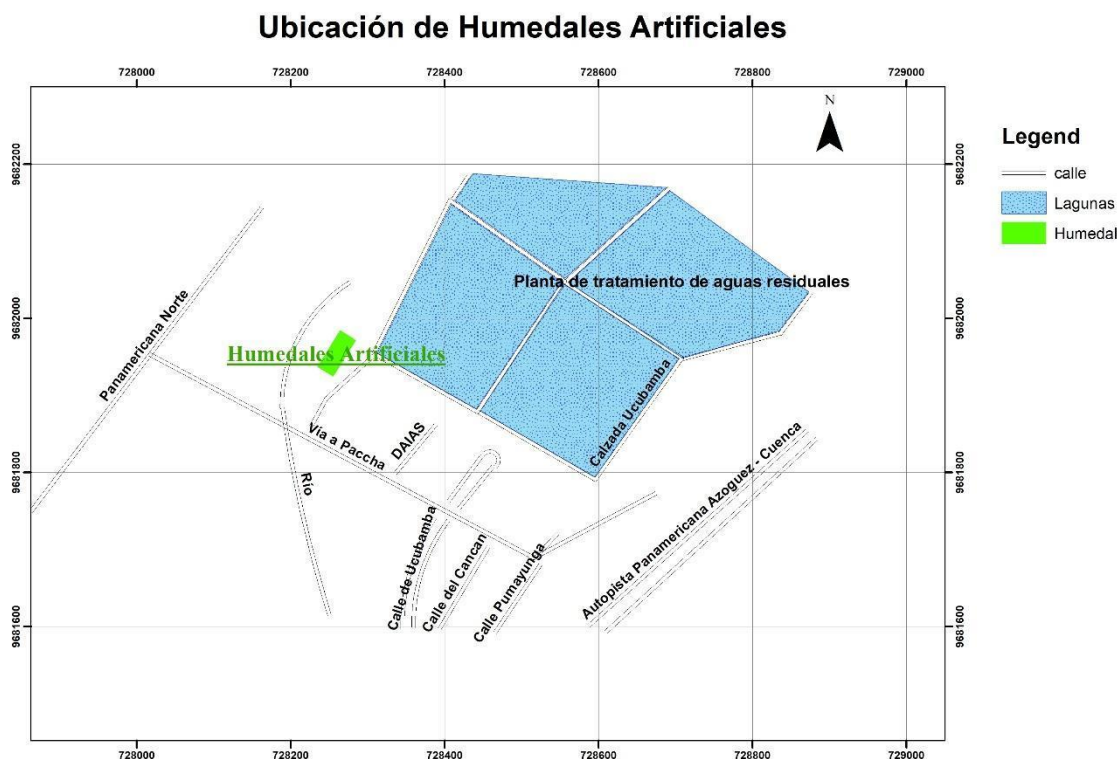


Figura 1 Ubicación de los Humedales Artificiales pilotos
Fuente: Elaboración propia

2.2.Descripción del diseño de los pilotos

El sistema construido de humedales tipo francés modificado que comprende la primera etapa, está compuesto por tres unidades de filtrado en paralelo, dos para tratar aguas residuales crudas y la tercera para tratar lodos (para el presente estudio solo se utilizaron las unidades de aguas residuales crudas).



Figura 2 Sistema construido de humedales tipo francés
Fuente: Autor propio

Los humedales de la PTAR están conformados por planchas de acero ASTM A36 con un espesor mínimo de 3mm, la carga de diseño para las estructuras de soporte es de al menos 2 toneladas por metro cuadrado. Para el sistema tuberías y accesorios se usó PVC y los tanques de carga y descarga son de polietileno. Además, el sistema está conformado por el tanque de almacenamiento (1) (figura 3), capacidad de 1 m³ y su función es la de alimentar a los humedales, tanques de descarga (2, 3) como se observa en la figura 4, capacidad 200 litros, se encargan de recibir el agua tratada de cada humedal y evacuarla.



Figura 3 Tanque de almacenamiento (1)
Fuente: Autor propio

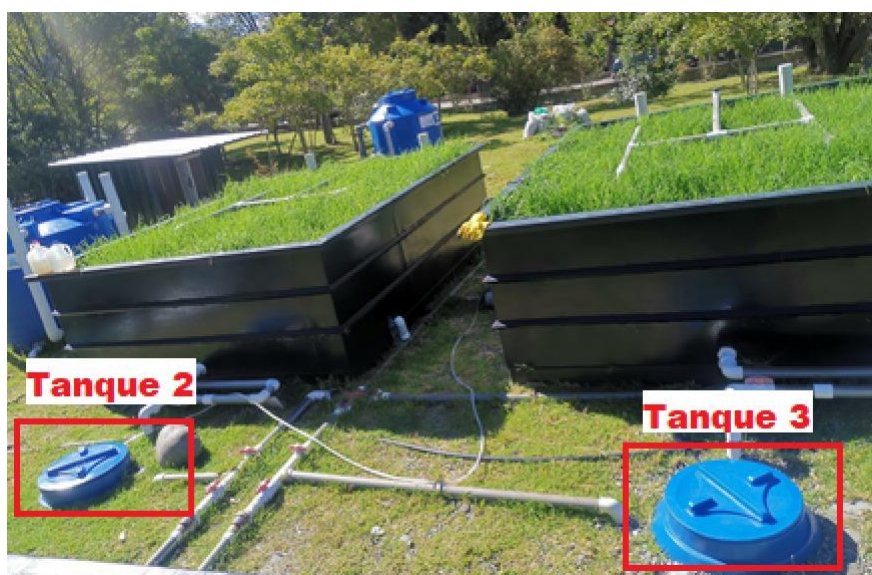


Figura 4 Tanques de descarga, al lado izquierdo se muestra el tanque de descarga 2 y del lado derecho el tanque de descarga 3.
Fuente: Autor propio

La forma geométrica de cada humedal es rectangular, con un área superficial de filtro de 9.81 m^2 y una profundidad media de 0.7 m (figura 5). El medio filtrante usado de arriba abajo está conformado por 3 capas:

- Primera capa con espesor de 30 cm se usó grava pequeña $\phi 2 - 10\text{mm}$.
- Segunda capa con espesor de 20 cm de grava media $\phi 10 - 20\text{mm}$.
- Tercera capa con espesor de 20 cm de grava grande $\phi 20 - 60\text{mm}$.

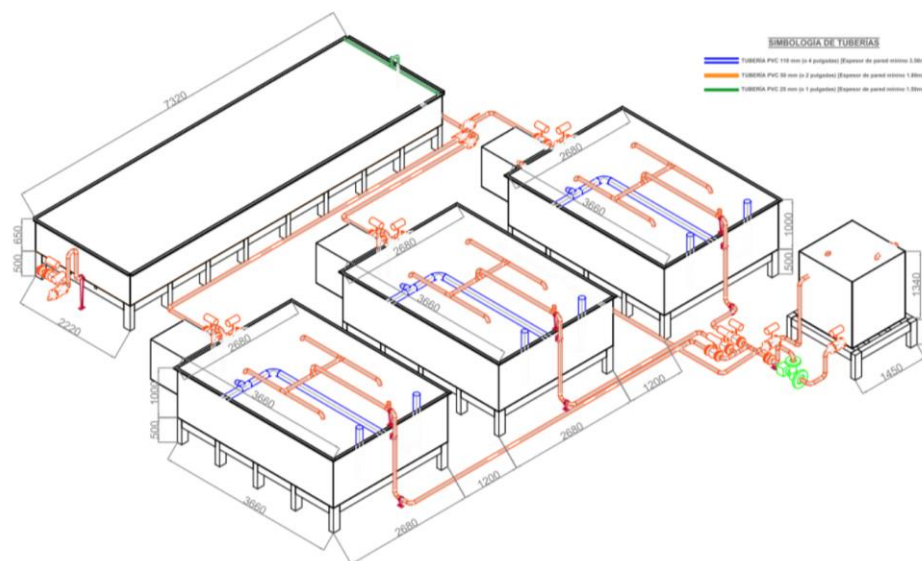


Figura 5 Esquema de la estación experimental de aguas residuales sin escala
Fuente: Arévalo Durazno et al., 2020

El nombre de la vegetación plantada es *Lolium perenne* (figura 6), ya que este tipo de planta presenta características de fácil adaptación a las condiciones presentadas en este estudio, como ya se explicó anteriormente.

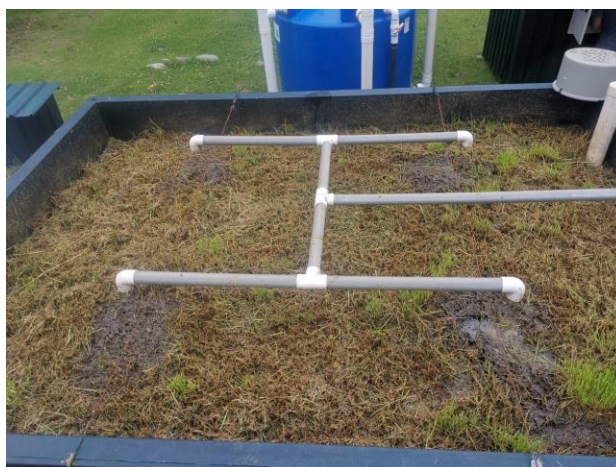


Figura 6: Adaptación de Lolium Perenne en el humedal 1
Fuente: Autor propio

2.3.Descripción de la operación de los pilotos

En la PTAR de Ucubamba, el agua residual pasa por un proceso de cribado y eliminación de arena, posteriormente, una parte del efluente es desviada una distancia aproximada de 380 m hacia el área de estudio. Aquí es receptada por el tanque de almacenamiento, donde

una bomba sumergida manejada por un Controlador Lógico Programable (PCL) distribuye el agua en las unidades de filtrado (figura 7).



Figura 7 Controlador Lógico Programable
Fuente: Autor propio

El ciclo operativo consiste en tres días de alimentación, seguidos de seis de descanso para cada unidad. La alimentación para cada unidad se realizó de forma intermitente durante 2.5 minutos cada hora (24 pulsos por día) con un volumen 0.39 m^3 , lo que resulta en una carga hidráulica instantánea de $0.95 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \cdot \text{día}}$ en cada unidad.

Para lograr una distribución uniforme en toda la superficie del humedal se colocaron cuatro tubos de ϕ 50 mm de PVC, ubicados en la capa superior del humedal como se muestra en la figura 8.



Figura 8 Sistema de distribución de humedales
Fuente: Autor propio

Como se puede observar, el sistema de alimentación está colocado de tal forma que, la distribución casi llega a ser homogénea.

Por otro lado, para el sistema de drenaje se utilizaron tubos perforados de PVC de 110 mm ubicados en la parte inferior del humedal, conectados a la superficie para aireación.

Finalmente, el agua residual se mueve hacia los filtros del humedal, una vez que atraviesa estas capas, el efluente es transportado en el fondo por una tubería perforada hacia una caja de salida. En la figura 9 se observa un esquema general del proceso experimental en los humedales.

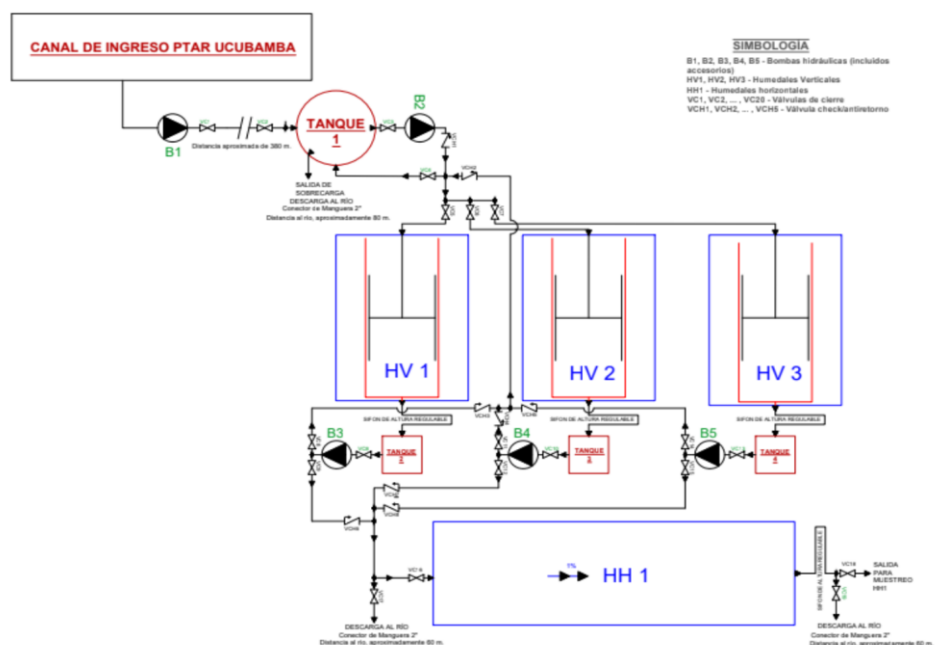


Figura 9: Esquema general del proceso experimental en los humedales

Fuente: Alvarado A, Montalván P. Estación experimental para tratamiento de aguas residuales. [Plano]. Septiembre del 2018

2.4. Plan de monitoreo

Para el control de los humedales, se realizó un plan de monitoreo respecto a la remoción de carga orgánica y sólidos de las aguas residuales y la caracterización de los caudales a la salida del humedal, durante los primeros meses de operación de los humedales.

Como primer paso, se elaboró un calendario basado en el ciclo de los humedales; tres días de alimentación con seis días de descanso correspondiente para cada unidad, el calendario utilizado se muestra en el anexo 1. Esta fase de estudio comenzó el 26 de enero de 2021 y culminó el 26 de mayo del mismo año.

El plan de monitoreo consistió en:

Día 1

- Abrir la llave (figura 10) para alimentar el humedal correspondiente en el período establecido.

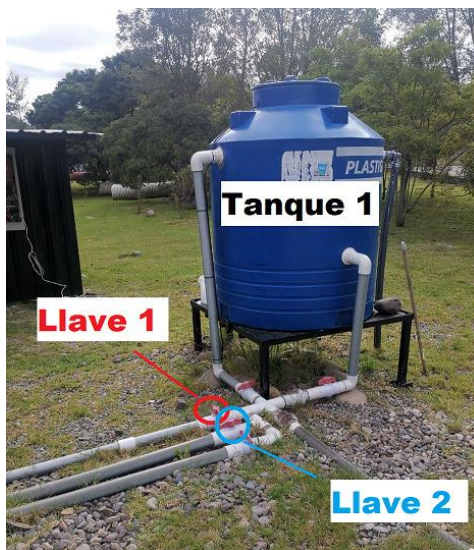


Figura 10 Llaves para alimentar los humedales
Fuente: Autor propio

- Realizar una revisión general del funcionamiento de sensores, bomba y tiempos programados determinados.

Día 2:

- Programar el equipo de muestreo (ISCO) (figura 11), con una hora de inicio que varió entre las 8 am y 9 am, el cual permite recolectar una muestra cada hora durante todo el día (figura 12).



Figura 11 Programador sistemático ISCO
Fuente: Autor propio



Figura 12 Muestras recolectadas durante un día
Fuente: Autor propio

- Tomar una muestra puntual de entrada (agua cruda) (figura 13) y una de salida.



Figura 13 Muestra de agua residual cruda
Fuente: Autor propio

- Se mide el caudal de salida con el método volumétrico, el cual arranca a las 8:55 am, durante 20 minutos hasta las 9:15 am, posteriormente a las 9:25 am se mide un caudal extra.
- Los datos obtenidos son registrados en una hoja de cálculo en Excel para su posterior análisis.

Día 3:

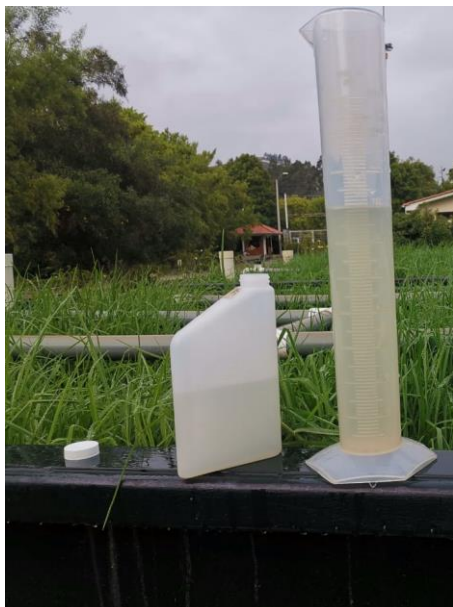


Figura 14 Uso de la probeta para tomar las muestras
Fuente: Autor propio



Figura 15 Muestra compuesta para ser analizada 100 ml de cada botella
Fuente: Autor propio

Una vez recogidas todas las muestras, se tomaron 100 ml de cada muestra (figura 14) para realizar una compuesta (2400 ml), la cual es la muestra a ser analizada (figura 15).

- El equipo utilizado es lavado para su siguiente uso.
- Se procede a cerrar la llave del humedal en funcionamiento para que el humedal descanse por un periodo de 6 días.

Este proceso se repitió para cada humedal durante los cuatro meses de muestreo.

Los datos recopilados fueron registrados para su posterior análisis con el objetivo de probar la eficiencia de los humedales artificiales.

2.4.1. Eficiencia de remoción de la materia orgánica y sólidos

Para la evaluar la eficiencia de remoción de materia orgánica y sólidos del sistema, se realizaron tomas de muestras del agua residual y análisis físico-químicos del efluente y el afluente de las dos unidades, durante un período de cuatro meses, los parámetros utilizados fueron DQO, DBO y SST.

Para la demanda química de oxígeno (DQO), demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅) y sólidos suspendidos totales (SST), se tomaron muestras puntuales a la entrada y salida del humedal y muestras compuestas en el efluente.

Para el análisis de DQO y SST, las muestras fueron analizadas siguiendo los procedimientos de *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, y para DBO₅ se utilizó el sistema respirométrico *Lovibond BD 600* (Arévalo Durazno et al., 2020).

El sistema respirométrico Lovibond BD 600 determina la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) mediante la acción biológica de las bacterias en el agua residual. Su función consiste en el reemplazo del oxígeno disuelto en la muestra por el oxígeno del aire, mientras se cuantifica de la DBO, durante este proceso se genera una reacción química entre el hidróxido de potasio y el dióxido de carbono que se desarrolla simultáneamente, consecuentemente, se genera una caída de presión en el sistema, el cual es medido a través del sensor de DBO (Group, 2021)

En cuanto al equipo, ofrece resultados de la muestra en mg/l en una pantalla integrada y un gráfico que muestra la curva de DBO, el cual facilita la comprensión de los datos medidos.

2.4.2. Evaluación de hidrogramas de salida del humedal

Para la evaluar el caudal de salida, se mide el flujo de manera manual, con la ayuda de un recipiente de 3.8 litros o con la probeta que alcanza hasta los 1000 ml, mediante el método volumétrico; el proceso consiste en determinar (i) el tiempo que le toma al recipiente o la probeta en llenarse y (ii) el tiempo de vaciado, para, posteriormente realizar gráficos de caudales vs tiempo (hidrogramas). Para este proceso fue necesario el tiempo de llenado del recipiente y el tiempo muerto (figura 16 y 17), una vez que se conocen estos datos, se determina un tiempo promedio entre la hora inicial y final que le toma al recipiente en llenarse, se calcula el caudal con la fórmula de $Q = V/t$ (el volumen es variable, y, depende del recipiente que se use), y se realiza una gráfica con los datos obtenidos.



Figura 16: Tiempo de llenado de un recipiente de 3.8 lt
Fuente: Autor propio



Figura 17: Tiempo muerto del vaciado del recipiente
Fuente: Autor propio

Sobre esta base, se decidió tomar ocho muestras puntuales cada minuto y medio (siendo este tiempo, el necesario para poder tomar la muestra en campo), para determinar el volumen correspondiente que debe tomarse, primero se encontró la sumatoria de caudales totales correspondientes a las horas cada minuto y medio, comenzando desde las 8:55:30, el volumen total es de 2000 ml, conocidos estos datos, se procedió a realizar el cálculo; volumen total por el caudal en ese punto y dividido para el caudal total. Finalmente, se establecieron tiempos y volúmenes correspondientes para tomar en campo (figura 18), y, poder realizar la muestra compuesta a la salida del humedal, la cual fue analizada (figura 19).



Figura 18 Muestras puntuales cada minuto y medio
Fuente: Autor propio



Figura 19 Composición de la muestra
Fuente: Autor propio

Adicionalmente, a partir del hidrograma se pudo establecer el volumen entre aforos, para lo cual, se determina el tiempo intermedio entre caudales y se multiplica por la diferencia de los tiempos, de esta forma, se pueden ir acumulando los volúmenes y calcular uno total, y, finalmente ser comparado con el volumen de descarga inicial (388 lt aproximadamente).

2.5.Tamaño de la muestra

Se describe el número de muestras que llegan a ser significativas para garantizar que los resultados obtenidos sean confiables para el estudio que se está realizando. En este caso, se tomaron muestras durante un período de cuatro meses y se procedió a analizar los datos.

En la tabla 2 se realiza un resumen del número de muestras que se registraron.

Tabla 2: Cantidad de muestras registradas
Fuente: Elaboración propia

NÚMERO DE MUESTRAS RECOLECTADAS						
	DQO		DBO		SST	
	Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada	Salida
Puntual	24	24	6	6	23	23
Compuesta		25		8		24

En el transcurso de la investigación en campo, el equipo requerido para la DBO presentó inconvenientes para su análisis, es por esto que, el número de muestras son inferiores en comparación a los demás parámetros.

3. CAPÍTULO

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La operación que se realice durante la etapa inicial de los humedales artificiales es un factor clave para alcanzar la estabilización del mecanismo de los humedales (aproximadamente un año), adicionalmente, se debe considerar las condiciones del clima que prevalecen en el lugar de muestreo, así como las características estructurales de cada humedal (Luna Pabello & Aburto Casta, 2014).

3.1 Cargas hidráulicas y orgánicas aplicadas

En cuanto a la aplicación de la carga hidráulica, la alimentación para cada unidad se realizó de forma intermitente como ya se explicó en la parte de metodología, con un volumen 0.388 m^3 , lo que resulta en una carga hidráulica aplicada de $0.95 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \cdot \text{día}}$ en cada unidad, que, de acuerdo a la literatura es mayor a las especificaciones francesas de $0.37 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \cdot \text{día}}$ (Molle et al., 2005), en consecuencia se tiene 2.6 veces más de sobrecarga hidráulica aplicada, lo que puede significar un menor tiempo de retención y por tanto menor eficiencia de remoción.

Durante la primera fase de operación se observó una alta variabilidad en las características del flujo de entrada, principalmente, este se debe a (i) las condiciones climáticas en las que se encuentra el sistema; Cuenca se caracteriza por presentar un clima lluvioso, templado y frío, y, (ii) el sistema de alcantarillado que se utiliza en la ciudad es combinado, lo que influye en la cantidad de carga hidráulica que debe aplicarse al sistema para alcanzar los valores de carga orgánica requerida.

En la tabla 3 se presentan las características del afluente para el H1 y H2.

Tabla 3 Características de calidad del afluyente

Fuente: Elaboración propia

Características de la carga de masa superficial				
Piloto	Parámetro	Unidad de medida	Valor medio	Desviación estándar
H1	DQO	g/m ² .d	152	70
	DBO	g/m ² .d	91	44
	TSS	g/m ² .d	103	65
H2	DQO	g/m ² .d	206	151
	DBO	g/m ² .d	202	84
	TSS	g/m ² .d	177	163

En la tabla 4 se observa que, en comparación al estudio realizado en P. Molle (2006), el cual utiliza aguas residuales sedimentadas, la carga de DQO aplicada es de 250 (70) $\frac{g}{m^2.d}$; se observa que el valor medio del afluyente aplicado para el H1 es de 152 (70) $\frac{g}{m^2.d}$, que es menor a lo recomendado, y para el H2 la carga es de 206 (151) $\frac{g}{m^2.d}$, que presenta una variación estándar significativamente alta, por lo cual no se podría decir que se alcanza el valor requerido.

De igual forma, para los valores de DBO se presentan cargas orgánicas significativamente bajas, para el H1, con un valor medio de 91 (44) $\frac{g}{m^2.d}$, en comparación a lo que sucede en P. Molle (2005) que utiliza una carga orgánica de 300 $\frac{g}{m^2.d}$ para pequeñas comunidades en Francia, por otra parte, para el H2, las cargas son mayores con un valor medio de 202 (84) $\frac{g}{m^2.d}$, que se acercan más a lo requerido, sin embargo no logra alcanzar lo recomendado.

Según Morvannou (2015) para SST, el valor de diseño generalmente aplicado es de 150 $\frac{g}{m^2.d}$, en la tabla 2 se observa que las cargas utilizadas en las unidades piloto presentan valores semejantes, por un lado, el H1 con valores de 103 (65) $\frac{g}{m^2.d}$, y el H2 con un valor superior de 177 (163) $\frac{g}{m^2.d}$.

Tabla 4 Características de la carga de masa superficial

Fuente: Elaboración propia

Características de la carga de masa superficial				
Piloto	Parámetro	Unidad de medida	Valor medio	Desviación estándar
H1	DQO	g/m2.d	152	70
	DBO	g/m2.d	91	44
	TSS	g/m2.d	103	65
H2	DQO	g/m2.d	206	151
	DBO	g/m2.d	202	84
	TSS	g/m2.d	177	163

Se hace notoria la naturaleza diluida de las aguas residuales debido al tipo de alcantarillado. Esto significa un gran reto para el correcto funcionamiento de los humedales, debido a que la carga orgánica es un factor clave para el crecimiento de la biomasa y a la vez, es la que permite mantener las condiciones aeróbicas adecuadas dentro del lecho filtrante y mineraliza los depósitos orgánicos de las aguas residuales (Pascal Molle, 2014).

Es importante destacar que, al aplicar altos niveles de carga orgánica, con bajos niveles de carga hidráulica, el humedal posee la capacidad para retener la materia orgánica, sin embargo, en este estudio las condiciones de cargas hidráulicas altas con cargas orgánicas que no alcanzaron los valores recomendados, presentaron un gran desafío durante esta primera fase de operación.

3.2. Características de la biomasa en los humedales

Los humedales pilotos comenzaron su primera fase de operación en septiembre del 2020, con un tiempo de funcionamiento total hasta la fecha de ocho meses, lo que indica que todavía no alcanzan su etapa de madurez.

Uno de los factores más evidentes es el limitado crecimiento de la biomasa en cada unidad, según P. Molle (2014) cada año crece aproximadamente 2.5 cm de capa de depósito, esta tiene un rol importante en cuanto a la eficiencia del humedal ya que es la encargada de la correcta distribución del flujo en la superficie, así como de la infiltración el agua y la transferencia de gases.

El sistema de alimentación está colocado de tal forma que la distribución casi llega a ser homogénea, sin embargo, como se observa en las figuras 20 y 21, el punto de caída del

afluente genera una capa de lodo más notoria en la superficie del humedal, provocando que existan zonas muertas, sobre todo, en las esquinas, donde no se logra cubrir toda la superficie con el afluente. Esta tendencia debería eliminarse ya que, con el paso del tiempo se estima una superficie completamente cubierta de lodo.

Día 3:



Figura 20 Punto de caída del afluente
Fuente: Autor propio

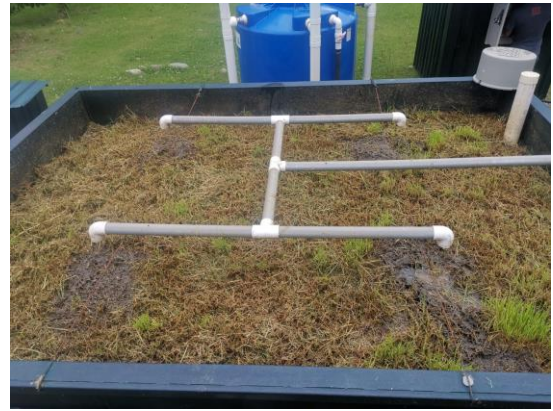


Figura 21: Generación de lodos en la superficie
Fuente: Autor propio

En la investigación en campo se observó una diferencia notoria en cuanto a la distribución del afluente; en el humedal 1 existe una capa de lodo que cubre gran parte del área superficial, con presencia de pequeñas zonas muertas en las esquinas, como se muestra en la figura 22, mientras que el humedal 2, presenta una capa de lodo con menor cobertura superficial, tanto en las esquinas (figura 23) como en los laterales de los humedales (figura 24).



Figura 22: Ausencia de lodo en la esquina del humedal 1
Fuente: Autor propio

Día 3:



Figura 23: Presencia de zonas muertas en las esquinas del humedal 2
Fuente: Autor propio



Figura 21: Figura 24: Presencia de zonas muertas en los laterales del humedal 2
Fuente: Autor propio

Consecuentemente, se demuestra que aún no se ha generado una capa de lodo como la que se requiere, esto se debe en primera instancia a una falta de distribución equitativa de agua residual en la superficie, además de la falta de mayores concentraciones de carga orgánica en el humedal, lo que puede verse reflejado en la eficiencia de remoción de los humedales, no obstante, se presentan resultados exitosos de remoción, los cuales indican que, a pesar de las condiciones tan desfavorables que se prestan, existe una generación de biomasa que está dando un adecuado tratamiento, sin embargo, se necesita más tiempo para que pueda formarse una capa de lodo.

3.3 Remoción de la materia orgánica

3.3.1. Muestras puntuales DQO

La función que han desarrollado los pilotos también se ha enfocado en evaluar la eliminación de DQO. La figura 25 muestra las concentraciones en el afluente y efluente de las dos unidades H1 y H2, en el cual, se destacan las concentraciones en los efluentes por presentar gran disminución y estabilidad en su densidad a comparación de los afluentes que son más variables, lo que revela la potencia del sistema.

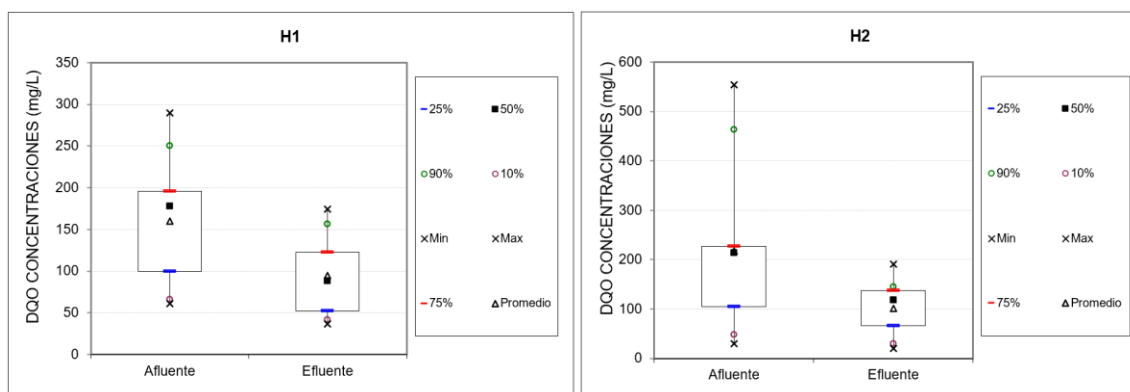


Figura 25: Concentraciones de DQO para afluentes y efluentes en H1 y H2.
Fuente: Autor propio

En el H1 el afluente presentó un valor máximo, superior a los 250 mg/L y un valor mínimo inferior no menor a los 50 mg/L, sin embargo, la media se encuentra dentro del percentil entre el 25% y 75% de las concentraciones de DQO aplicadas en el humedal, con un valor de 160 (74) mg/L.

Para el H2, la concentración máxima del afluente está sobre los 500 mg/L, siendo casi el doble de valor que en H1 y la mínima por debajo de los 50 mg/L, sin embargo, la media tiende al 50% del total de las concentraciones, con un valor de 217 (159) mg/L. Por otra parte, el efluente presentó una concentración máxima de 190.4 mg/L.

En el estudio realizado por García Zumalacarregui & Von Sperling (2018), con condiciones climáticas que difieren en la temperatura: superiores a los 21,8 °C, con concentraciones de entrada media de 441 (123) mg/L, en comparación, a la investigación realizada en campo se observa que los valores de DQO aplicados presentan concentraciones significativamente bajas, por el contrario, para el efluente, se obtuvieron valores de 95 (56) mg/L y 101 (64) mg/L para H1 y H2 respectivamente, que son semejantes al estudio realizado por García Zumalacarregui & Von Sperling (2018) con una concentración media de salida de 87 (48) mg/L.

En la figura 26, se observa el porcentaje remoción para el H1 y H2, con eficiencias del 39.7% y 45.5 respectivamente, al comparar estos valores con el estudio realizado por García Zumalacarregui & Von Sperling (2018) con un porcentaje de remoción del 69%, y con Morvannou (2015) con remoción de 80%, se observa que la primera fase del

humedal aún requiere un tiempo de maduración para llegar a mejores resultados de remoción.

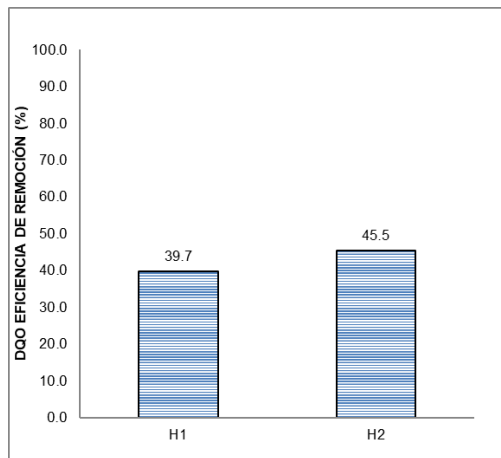


Figura 26: Eficiencia de remoción de DQO
Fuente: Autor propio

Además, se observa que en el humedal 2, en donde hubo mayores concentraciones de entrada la eficiencia de remoción fue mejor.

Lombard-Latune (2020) realizó una investigación que compara diferentes tecnologías de tratamiento, se demuestra que los humedales artificiales de flujo vertical subsuperficial franceses son los que predominan en tratar aguas residuales. Como se dijo anteriormente, el sistema todavía no ha alcanzado su etapa de madurez, sin embargo, los resultados son muy satisfactorios.

3.3.2 Muestras compuestas DQO

Las concentraciones promedio en las muestras recolectadas fueron de 98 mg/L y 79 mg/L para H1 y H2, de forma similar, los 87 mg/L de García se ajusta al intervalo conseguido, tomando en cuenta que el área superficial del humedal de García, corresponde a 29.17 m² que llega a ser casi tres veces más grande a los 9.81 m² correspondiente a las unidades pilotos, es decir que existe la presencia de mayor cantidad de biomasa, pero con simultaneidad en la altura del sistema que corresponde a 70 cm. Finalmente, en la figura 27, se observa que el 100% de los datos recolectados llegan a ser menores de 250 mg/L, de esta forma, se logra cumplir con la norma TUSLMA.

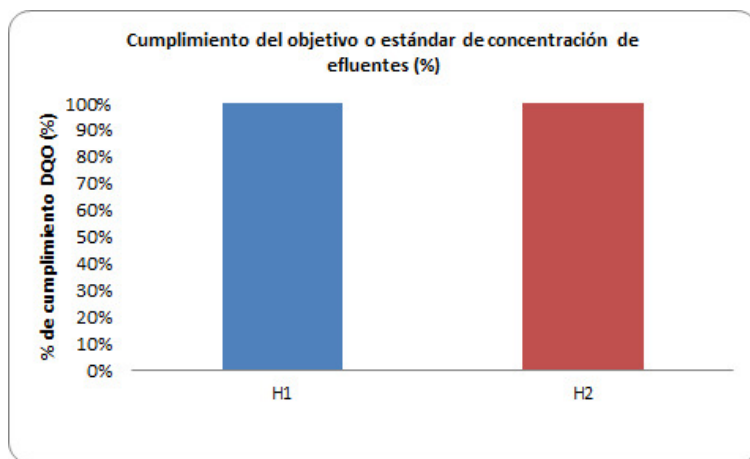


Figura 27: Porcentaje de datos de DQO, que cumplen con la norma Tulsma.
Fuente: Autor propio

3.3.2. Muestras puntuales DBO

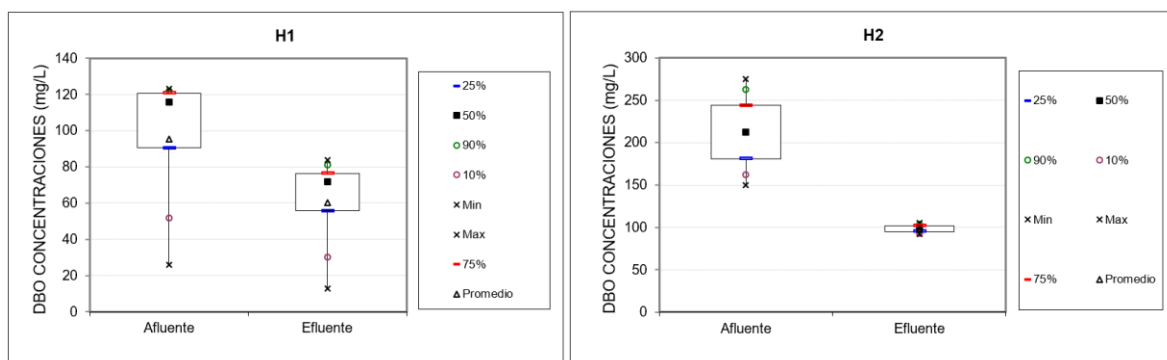


Figura 28: Concentraciones de DBO para afluentes y efluentes en H1 y H2.
Fuente: Autor propio.

Se recolectaron 6 muestras para analizar la eficiencia de remoción de la DBO, debido a inconvenientes suscitados en campo, en la figura 28 se observan las concentraciones del afluente y el efluente para el humedal 1 y 2. Las concentraciones medias de entrada durante la primera fase de operación fueron de 95 mg/L (max- min: 123- 26 mg/L), 213 mg/L (max- min: 275- 150 mg/L), para el H1 y H2, respectivamente.

En cuanto a las concentraciones medias de salida fueron de 60 mg/L (max- min: 84- 13 mg/L) para el H1 y de 99 mg/L (max- min: 105- 92 mg/L) para el H2.

En comparación con García Zumalacarregui & Von Sperling (2018), el valor medio de entrada fue 237 (70) mg/L, lo que indica concentraciones elevadas, por lo tanto, el porcentaje de remoción que se obtuvo es mayor y fue del 78%, mientras que en los pilotos

se obtuvo porcentajes de 38.3 % y 57.4 % (figura 29), como se muestra en la figura 29 para H1 y H2 respectivamente, sin embargo, los resultados son satisfactorios debido a que el efluente no presenta una amenaza hacia un cuerpo receptor, que para este caso es el río de Cuenca.

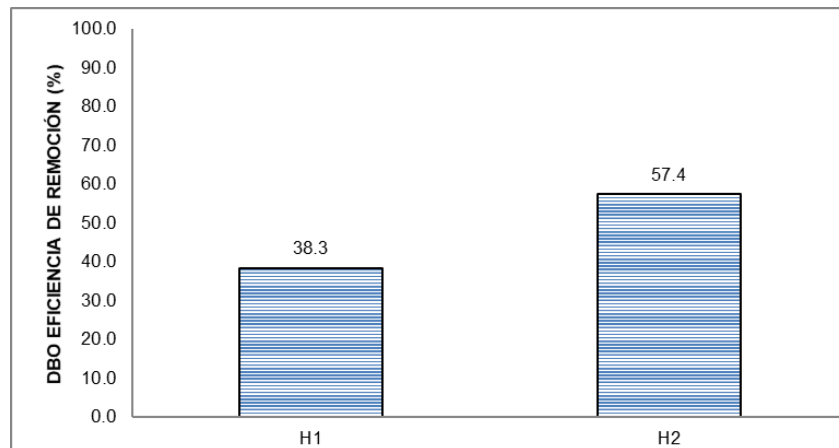


Figura 29: Eficiencia de remoción de DBO
Fuente: Autor propio

3.3.4 Muestras compuestas DBO

Con la base de datos recolectada, se obtuvo que el H1 y H2 presentaron valores medios de 57 mg/L y 63 mg/L, semejantes a los valores presentados por (García Zumalacarregui & Von Sperling, 2018); con condiciones hidráulicas similares, tiempo de alimentación de 3 min, carga hidráulica aplicada de $0.45 \frac{m^3}{m^2 \cdot día}$ concentración de entrada de 237 (70) mg/L, informa un valor medio de DBO de 49 mg/L, por lo tanto, se puede considerar que el sistema presentó un desempeño eficiente en términos de eliminación de materia orgánica.

En la figura 30 se observa que el 100 % de los datos recolectados están por debajo de 100 mg/L para DBO, que es lo que exige la norma ecuatoriana.

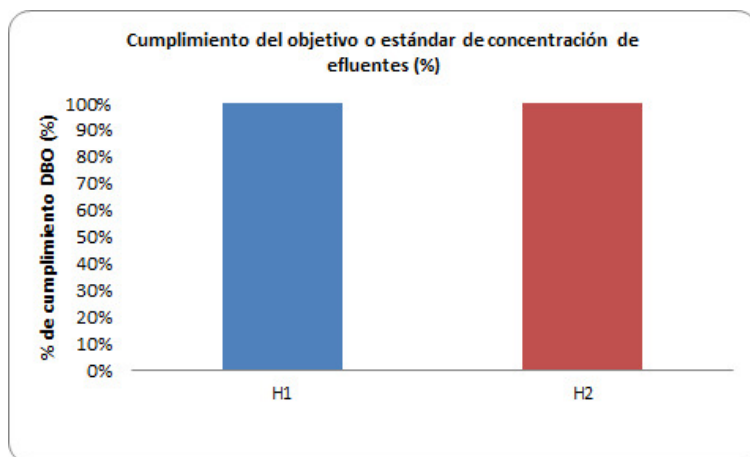


Figura 30: Porcentaje de datos de DBO, que cumplen con la norma Tulsma.
Fuente: Autor propio.

3.4 Remoción de sólidos suspendidos

3.4.1. Muestras puntuales SST

En la figura 31 se observan las concentraciones de SST en el influente y el efluente de las unidades piloto; tanto en el H1 como en el H2, se puede observar que existe una alta variabilidad en los valores entrada, se deben a las diferentes características que presenta el agua residual.

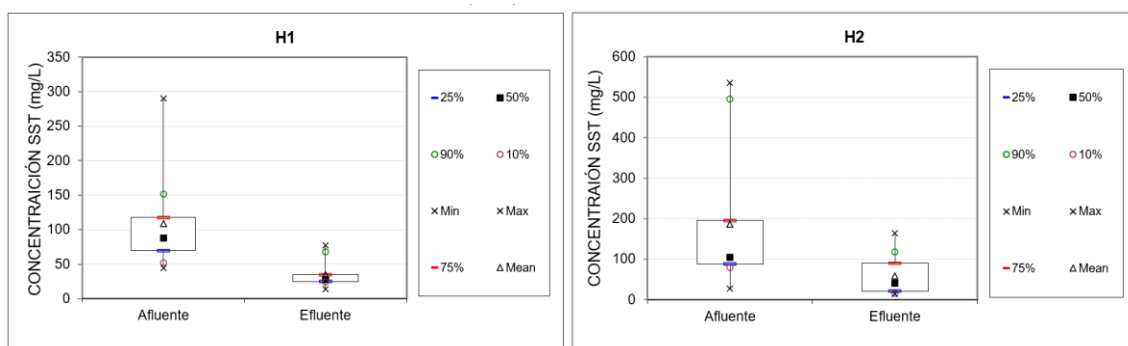


Figura 31: Concentraciones de SST para afluentes y efluentes en H1 y H2.
Fuente: Autor propio

En el H1, la concentración máxima del afluente está sobre los 250 mg/L y la mínima por debajo de los 50 mg/L, sin embargo, la media se encuentra dentro del percentil entre el 25% y 75% de las concentraciones de SST aplicadas en el humedal. Por el contrario, los valores extremos del efluente no prestan esta gran variabilidad, y están cercanos al valor medio.

En el H2, los valores del afluente son incluso más variables que el H1, con un valor máximo superior a los 500 mg/L y un valor mínimo inferior a los 50 mg/L, a pesar de que el valor de la media se encuentra dentro del 50 % del total de las muestras analizadas, este tiene tendencia hacia el valor extremo superior del 75% del total de las concentraciones. Mientras que, los valores del efluente presentan poca variabilidad y gran eficiencia de remoción.

Para el H1 con las concentraciones medias de entrada de 109 (68) mg/L, presenta valores inferiores a los obtenidos en García Zumalacarregui & Von Sperling (2018) con una concentración de 190 (82) mg/L, por otra parte, se presentaron valores semejantes para el H2, con concentraciones de 186 (171) mg/L.

En cuanto al efluente, la eficiencia de remoción se presenta en la figura #, con concentraciones de salida de 35 (24) y 59 (59) para el H1 y H2 respectivamente, que son valores semejantes a 34 (23) presentados en García Zumalacarregui & Von Sperling (2018).

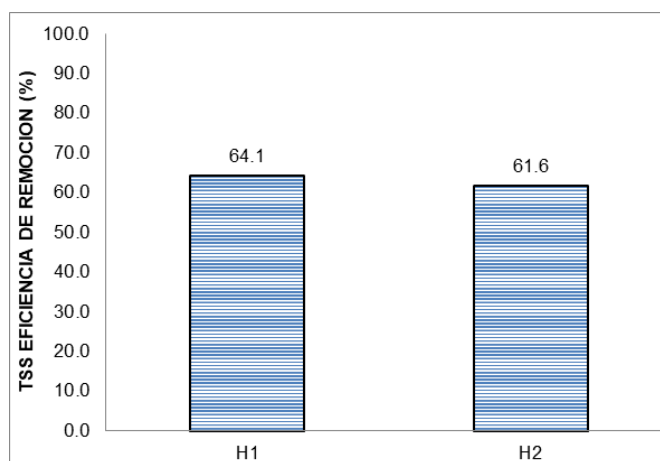


Figura 32: Eficiencia de remoción de SST
Fuente: Autor propio

En la figura 32 se observa que el porcentaje de remoción máximo para SST es de 64.1 %, sin embargo, en el estudio realizado por Morvannou (2015) el porcentaje de remoción para STT alcanza 91%, lo que indica que el humedal presenta un valor significativamente bueno pero aún le falta alcanzar una mejor remoción.

Existe una mayor eficiencia de remoción en el H1, a pesar de que el afluente en el H2 presenta mayores concentraciones de entrada, sin embargo, este porcentaje de remoción no representa un valor significativamente mayor.

Cabe resaltar que los SST son los valores que presentan mayor porcentaje de remoción en comparación a los otros dos parámetros, esto se debe a que la eliminación de DQO, puede verse afectada por la aplicación de sobrecargas hidráulicas (P Molle et al., 2005) y para los valores de DBO, no se pudo obtener una muestra representativa.

3.4.2 Muestras compuestas SST

Se obtuvieron bajas concentraciones de SST en la primera etapa de este estudio, se debe a una eficiente generación de la capa de lodo en la superficie del filtro, la cual según P Molle (2005) limita la tasa de infiltración y por tanto el flujo hidráulico que pasa a través del filtro. Molle (2003), explica que este factor restrictivo que modifica la función de la carga hidráulica y el tiempo de aireación, se puede reducir con la generación de plantas en los humedales.

Con los datos recolectados de muestras compuestas se obtuvo un promedio de 33.26 mg/L y 30.14 mg/L para el H1 y H2, que, según la normativa del Ecuador, TULSMA, están por debajo de los límites requeridos para la descarga a cuerpos de agua dulce correspondiente a concentraciones inferiores a 100 mg/l, como se observa en la figura 33, el 100 % de las muestras tomadas en campo cumplen con la normativa ecuatoriana.

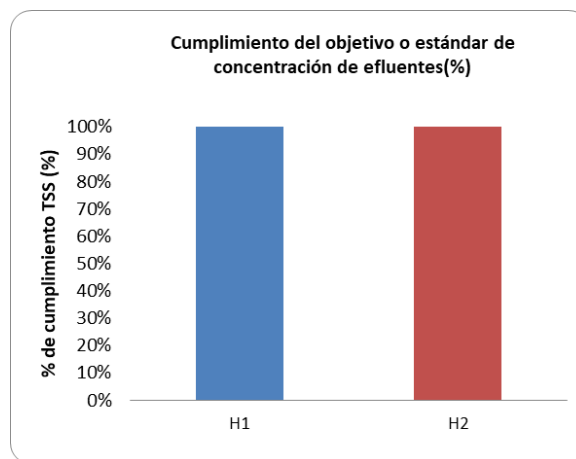


Figura 33: Porcentaje de datos de SST, que cumplen con la norma Tulsma.
Fuente: Autor propio

3.3. Evaluación de hidrogramas de salida

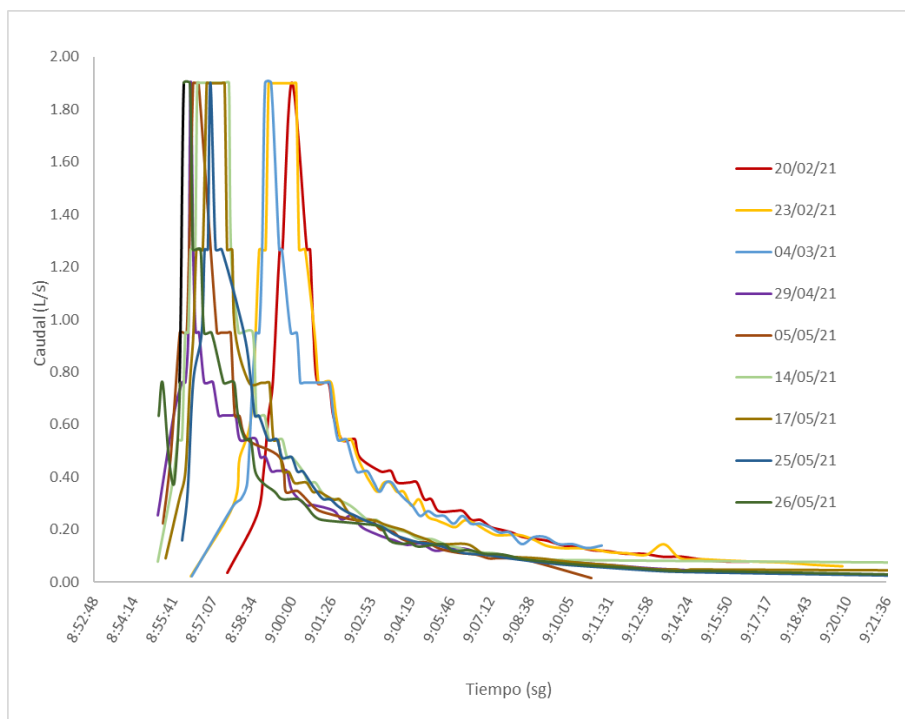


Figura 34: Hidrogramas de efluentes
Fuente: Autor propio

En la figura 34 se observa la variación de 9 aforos recolectados durante los 4 meses de la primera fase de operación, se determinó que las muestras presentaron un caudal máximo de 1.9 L/s, el pico se produjo en un tiempo promedio de 1.21 min (máx: 2.07 min y mín:1.2 min) desde la hora de inicio de la muestra; en el estudio realizado por (García Zumalacarregui & Von Sperling, 2018) el pico se produjo a los 5 minutos, con un caudal de 1.1 L/s, se estima que esta diferencia de tiempo se debe a la madurez de las unidades, en el caso del estudio realizado por García Zumalacarregui & Von Sperling, las operaciones comenzaron en 2009, y a partir del año 2014 el sistema comenzó a trabajar con dos unidades en paralelo, de ahí que, el tiempo de maduración del sistema hasta el momento final del estudio fue de 8 años, por tanto, la generación de una capa de biomasa es más notoria y representativa que para este estudio con apenas 8 meses de maduración, además, esto influye directamente en el tiempo de retención hidráulico, y por tanto, aumenta el tiempo en el sistema y para alcanzar el pico máximo de los caudales.

También, se pueden observar dos tiempos en donde se producen los caudales, por un lado, el primer pico se produce aproximadamente al 1.18 minutos, mientras que el otro pico se produce al 1.28 minutos, esta diferencia de tiempo se debe al día en el que se realizó la toma de muestra del caudal. Existe una mayor retención de líquido cuando han transcurrido más días y se ha acumulado materia orgánica en el filtro, el agua se retiene en los poros y se va liberando gradualmente en los siguientes pulsos (Moraes et al., 2019).

El comportamiento de cada hidrograma se ve caracterizado por un fuerte aumento en la entrada y una disminución inmediata, esto indica una buena eficiencia de la hidráulica del sistema debido a que permite una transferencia efectiva de oxígeno por convección y difusión (Kayser & Kunst, 2005).

De igual forma, se determinó el volumen acumulado hasta el momento que sucedió el pico máximo del caudal, con 84.67 (44.6) L, que representa el 25% del volumen total. Además, se observó que el 50% del volumen transcurrió durante los primeros 3 minutos 36 segundos y el 80% a los 9 min 15 segundos aproximadamente. Por otra parte, se determinó un volumen promedio total de salida de 335.76 L (max: 465.71 L y min: 244.80 L), si se compara con el volumen que descarga el tanque de almacenamiento de 388.29 L, se comprueba que existe una pérdida de volumen. Principalmente, esta se debe a la retención de líquido dentro del sistema, que se da por la saturación del filtro y en consecuencia retención de líquido en el sistema (Moraes et al., 2019).

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el presente estudio se evaluó el desempeño de la primera fase de operación modificada del uso de humedales artificiales de flujo subsuperficial vertical de tipo Francés, alimentando con aguas residuales provenientes de alcantarillado combinado.

Se confirmó que el sistema es robusto y adecuado para el tratamiento de aguas residuales, capaz de soportar la sobrecarga hidráulica aplicada al sistema y la alta variabilidad presente en los efluentes que tienen relación directa en el comportamiento hidráulico del filtro. En el análisis de datos de caudales se determinó que el tiempo de retención hidráulica dentro del sistema es apto para alcanzar una buena remoción con eficientes porcentajes de:

- Eliminación de DQO eficiencia del 39.7% para el H1 y 45.5% para el H2.
- Eliminación de DBO eficiencia del 38.3% para el H1 y 57.4% para el H2.
- Eliminación de SST eficiencia del 64.1% para el H1 y 61.6% para el H2.

Con respecto a los hidrogramas de salida se llega a entender que el caudal máximo se manifiesta en un corto tiempo debido a la escasez de biomasa. Por otro lado, se determinó que el volumen promedio acumulado es muy cercano al volumen de descarga, por lo que, el sistema estaría reteniendo un volumen despreciable de agua (efluente).

Los resultados indican que un sistema maduro llegaría a ser apto para tratar aguas servidas de origen rural, ya que estas suelen contener menor contaminación en comparación del agua residual de un alcantarillado combinado.

En cuanto a la capa de lodo generada, se observó que ocho meses de operación no son suficientes para generar una capa de lodo homogénea en toda la superficie del humedal, sin embargo, durante el periodo de análisis también fue notorio un significativo crecimiento de la biomasa, sobre todo en las zonas que están expuestas de forma directa

al afluente, el sistema ha demostrado una buena eficiencia y se estima que, a medida que vaya madurando, se forma una capa de lodo homogénea en toda la superficie y mejore su nivel de desempeño.

Finalmente, se recomienda que se realicen más estudios cuando los humedales alcancen su etapa de madurez y se evalúe el desempeño del sistema, esto permitiría una mejor comprensión de su funcionamiento y determinación de la factibilidad de su uso.

BIBLIOGRAFÍA

- Amoatey, P., & Bani, R. (2016). Wastewater Management. In *Department of Agricultural Engineering* (Vol. 130, Issue 6).
<https://doi.org/10.4324/9781351179430-5>
- Arévalo Durazno, M. B., García Zumalacarregui, J. A., Andrea, N., & Andrés, A. (2020). *Modified First Stage of French Vertical Flow Constructed Wetlands for Wastewater Treatment in Highlands : Start-Up of the System*. 1–11.
- Moraes, M. A., Zumalacarregui, J. A. G., Trein, C. M., Ferreira, V. V. M., & Von Sperling, M. (2019). Outflow dynamics in a French system of vertical wetlands operating with an extended feeding cycle. *Water Science and Technology*, 79(4), 699–708. <https://doi.org/10.2166/wst.2019.088>
- Dotro, G., Langergraber, G., Molle, P., Nivala, J., Puigagut, J., Stein, O., & Von Sperling, M. (1997). Treatment Wetlands. In *Journal of Environmental Quality* (Vol. 26, Issue 5). IWA Publishing.
<https://doi.org/10.2134/jeq1997.00472425002600050040x>
- García Zumalacarregui, J. A., & Von Sperling, M. (2018). Performance of the first stage of the French system of vertical flow constructed wetlands with only two units in parallel: Influence of pulse time and instantaneous hydraulic loading rate. *Water Science and Technology*, 78(4), 848–859. <https://doi.org/10.2166/wst.2018.355>
- Group, T. (2021). *Lovibond ® Water Testing Sistema de medición DBO BD 600 Instrucciones*.
- Hernández-Ruiz, M., Pérez-Villar, M., Domínguez, E., & Cachaldora, I. (2012). Humedal Subsuperficial Vertical Para El Tratamiento De Aguas Residuales: Diseño, Construcción Y Evaluación. *Revista Cubana de Química*, XXIV(2), 147–154. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=443543726006>

- Jiménez, A. A. (2000). DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS DE CALIDAD DE LAS AGUAS. Antonio. *Gestión Ambiental*, 2(23), 12–19. <http://ocw.uc3m.es/ingenieria-quimica/ingenieria-ambiental/otros-recursos-1/OR-F-001.pdf>
- Kayser, K., & Kunst, S. (2005). Processes in vertical-flow reed beds: Nitrification, oxygen transfer and soil clogging. *Water Science and Technology*, 51(9), 177–184. <https://doi.org/10.2166/wst.2005.0314>
- Lombard-Latune, R., Lericquier, F., Oucacha, C., Pelus, L., Lacombe, G., Guennec, B. Le, & Molle, P. (2020). Performance and reliability comparison of French vertical flow treatment wetlands with other decentralized wastewater treatment technologies in tropical climates. *Water Science and Technology*, 82(8), 1701–1709. <https://doi.org/10.2166/wst.2020.444>
- Luna Pabello, M., & Aburto Casta, S. (2014). *Sistema de humedales artificiales para el control de la eutroficación del lago del Bosque de San Juan de Aragón*. 17(1), 32–55.
- Ministerio del Ambiente. (2003). Texto Unificado de Legislación Secundaria de Medio Ambiente, TULSMA. *Registro Oficial Edición Especial 2 de 31-Mar.-2003*, 3399, 1–578. www.lexis.com.ec
- Molle, P., Liénard, A., Grasmick, A., & Iwema, A. (2006). Effect of reeds and feeding operations on hydraulic behaviour of vertical flow constructed wetlands under hydraulic overloads. *Water Research*, 40(3), 606–612. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2005.11.026>
- Molle, P, Liénard, A., Boutin, C., Merlin, G., & Iwema, A. (2005). How to treat raw sewage with constructed wetlands: An overview of the French systems. *Water Science and Technology*, 51(9), 11–21. <https://doi.org/10.2166/wst.2005.0277>
- Molle, Pascal. (2014). French vertical flow constructed wetlands: A need of a better understanding of the role of the deposit layer. *Water Science and Technology*,

69(1), 106–112. <https://doi.org/10.2166/wst.2013.561>

Morvannou, A., Forquet, N., Michel, S., Troesch, S., & Molle, P. (2015). Treatment performances of French constructed wetlands: Results from a database collected over the last 30 years. *Water Science and Technology*, 71(9), 1333–1339. <https://doi.org/10.2166/wst.2015.089>

Paing, J., Guilbert, A., Gagnon, V., & Chazarenc, F. (2015). Effect of climate, wastewater composition, loading rates, system age and design on performances of French vertical flow constructed wetlands: A survey based on 169 full scale systems. *Ecological Engineering*, 80, 46–52. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.10.029>

Raffo L, E., & Ruiz L, E. (2014). Caracterización de las aguas residuales y la demanda bioquímica de oxígeno. *Journal of the American Chemical Society*, 106(22), 6751–6755. <https://doi.org/10.1021/ja00334a047>

Ricardo, R. (2002). Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales. *Universidad Politecnica de Cataluña*, 1(3), 39–51.

ROMERO, M., COLIN, A., SANCHEZ, E., & ORTIZ, L. (2009). Tratamiento De Aguas Residuales Por Un Sistema Piloto De Humedales Artificiales: Evaluación De La Remoción De La Carga Orgánica. *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*, 25, 157–167.

Silva, A., & Zamora, H. (2005). Humedales Artificiales. *PhD Proposal*, 1, 100.

Spon, E. & F. (1997). Chapter 4* - Wastewater as a Resource *. *Water Resources*.

Von Sperling, M. (2015). Wastewater Characteristics, Treatment and Disposal. In *IWA Publishing, Alliance House, 12 Caxton Street, London SW1H 0QS, UK* (Vol. 6, Issue 0). <https://doi.org/10.2166/9781780402086>

ANEXOS

Anexo 1. Calendario de toma de muestras

Lunes	Martes	Humedal 1
25/01/2021 9:00:00	26/01/2021 9:00:00	
Martes	Miércoles	
26/01/2021 9:00:00	27/01/2021 9:00:00	
Miércoles	Jueves	Humedal 2
27/01/2021 9:00:00	28/01/2021 9:00:00	
Jueves	Viernes	
28/01/2021 9:00:00	29/01/2021 9:00:00	
Viernes	Sábado	Humedal 3
30/01/2021 9:00:00	31/01/2021 9:00:00	
Sábado	Domingo	
25/01/2021 9:00:00	26/01/2021 9:00:00	
Domingo	Lunes	Humedal 1
31/01/2021 9:00:00	1/02/2021 9:00:00	
Lunes	Martes	
1/02/2021 9:00:00	2/02/2021 9:00:00	
Martes	Miércoles	Humedal 2
2/02/2021 9:00:00	3/02/2021 9:00:00	
Miércoles	Jueves	
3/02/2021 9:00:00	4/02/2021 9:00:00	
Jueves	Viernes	Humedal 3
4/02/2021 9:00:00	5/02/2021 9:00:00	
Viernes	Sábado	
5/02/2021 9:00:00	6/02/2021 9:00:00	
Sábado	Domingo	Humedal 1
6/02/2021 9:00:00	7/02/2021 9:00:00	
Domingo	Lunes	
7/02/2021 9:00:00	8/02/2021 9:00:00	
Lunes	Martes	Humedal 2
8/02/2021 9:00:00	9/02/2021 9:00:00	
Martes	Miércoles	
9/02/2021 9:00:00	10/02/2021 9:00:00	
Miércoles	Jueves	Ninguno
10/02/2021 9:00:00	11/02/2021 9:00:00	
Jueves	Viernes	
11/02/2021 9:00:00	12/02/2021 9:00:00	
Viernes	Sábado	Humedal 1
12/02/2021 9:00:00	13/02/2021 9:00:00	
Sábado	Domingo	
13/02/2021 9:00:00	14/02/2021 9:00:00	
Domingo	Lunes	Ninguno
14/02/2021 9:00:00	15/02/2021 9:00:00	
Lunes	Martes	
15/02/2021 9:00:00	16/02/2021 9:00:00	
Martes	Miércoles	
16/02/2021 9:00:00	17/02/2021 9:00:00	
Miércoles	Jueves	
17/02/2021 9:00:00	18/02/2021 9:00:00	

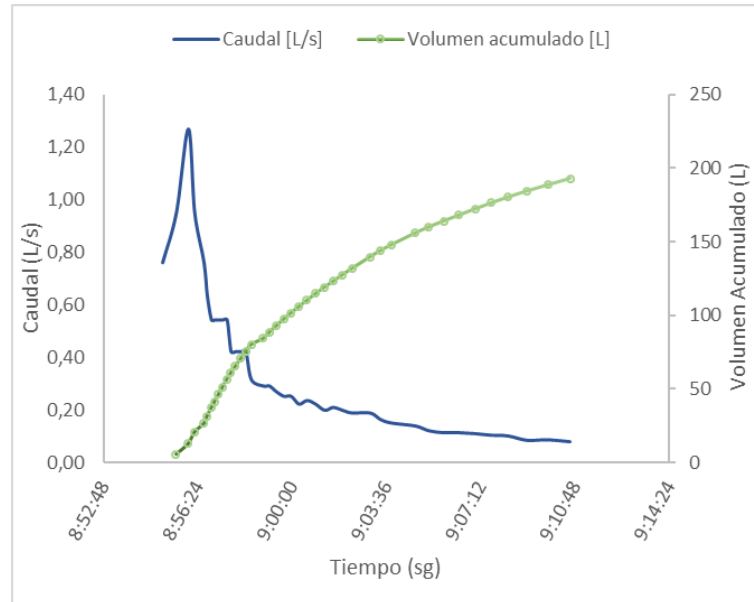
Jueves	Viernes	Humedal 1
18/02/2021 9:00:00	19/02/2021 9:00:00	
Viernes	Sábado	
19/02/2021 9:00:00	20/02/2021 9:00:00	
Sábado	Domingo	Humedal 2
20/02/2021 9:00:00	21/02/2021 9:00:00	
Domingo	Lunes	
21/02/2021 9:00:00	22/02/2021 9:00:00	
Lunes	Martes	Humedal 2
22/02/2021 9:00:00	23/02/2021 9:00:00	
Martes	Miércoles	
23/02/2021 9:00:00	24/02/2021 9:00:00	
Miércoles	Jueves	Ninguno
24/02/2021 9:00:00	25/02/2021 9:00:00	
Jueves	Viernes	
25/02/2021 9:00:00	26/02/2021 9:00:00	
Viernes	Sábado	Humedal 1
26/02/2021 9:00:00	27/02/2021 9:00:00	
Sábado	Domingo	
27/02/2021 9:00:00	28/02/2021 9:00:00	
Domingo	Lunes	Humedal 2
28/02/2021 9:00:00	1/03/2021 9:00:00	
Lunes	Martes	
1/03/2021 9:00:00	2/03/2021 9:00:00	
Martes	Miércoles	Humedal 2
2/03/2021 9:00:00	3/03/2021 9:00:00	
Miércoles	Jueves	
3/03/2021 9:00:00	4/03/2021 9:00:00	
Jueves	Viernes	Ninguno
4/03/2021 9:00:00	5/03/2021 9:00:00	
Viernes	Sábado	
5/03/2021 9:00:00	6/03/2021 9:00:00	
Sábado	Domingo	Humedal 1
6/03/2021 9:00:00	7/03/2021 9:00:00	
Domingo	Lunes	
7/03/2021 9:00:00	8/03/2021 9:00:00	
Lunes	Martes	Humedal 1
8/03/2021 9:00:00	9/03/2021 9:00:00	
Martes	Miércoles	
9/03/2021 9:00:00	10/03/2021 9:00:00	
Miércoles	Jueves	Humedal 2
10/03/2021 9:00:00	11/03/2021 9:00:00	
Jueves	Viernes	
11/03/2021 9:00:00	12/03/2021 9:00:00	
Viernes	Sábado	Humedal 2
12/03/2021 9:00:00	13/03/2021 9:00:00	
Sábado	Domingo	
13/03/2021 9:00:00	14/03/2021 9:00:00	
Domingo	Lunes	Ninguno
14/03/2021 9:00:00	15/03/2021 9:00:00	
Lunes	Martes	
15/03/2021 9:00:00	16/03/2021 9:00:00	
Martes	Miércoles	Ninguno
16/03/2021 9:00:00	17/03/2021 9:00:00	

Miércoles	Jueves	Humedal 1
17/03/2021 9:00:00	18/03/2021 9:00:00	
Jueves	Viernes	
18/03/2021 9:00:00	19/03/2021 9:00:00	
Viernes	Sábado	Ninguno
19/03/2021 9:00:00	20/03/2021 9:00:00	
Sábado	Domingo	
20/03/2021 9:00:00	21/03/2021 9:00:00	
Domingo	Lunes	Humedal 2
21/03/2021 9:00:00	22/03/2021 9:00:00	
Lunes	Martes	
22/03/2021 9:00:00	23/03/2021 9:00:00	
Martes	Miércoles	Humedal 1
23/03/2021 9:00:00	24/03/2021 9:00:00	
Miércoles	Jueves	
24/03/2021 9:00:00	25/03/2021 9:00:00	
Jueves	Viernes	Humedal 1
25/03/2021 9:00:00	26/03/2021 9:00:00	
Viernes	Sábado	
26/03/2021 9:00:00	27/03/2021 9:00:00	
Sábado	Domingo	Ninguno
27/03/2021 9:00:00	28/03/2021 9:00:00	
Domingo	Lunes	
28/03/2021 9:00:00	29/03/2021 9:00:00	
Lunes	Martes	Humedal 2
29/03/2021 9:00:00	30/03/2021 9:00:00	
Martes	Miércoles	
30/03/2021 9:00:00	31/03/2021 9:00:00	
Miércoles	Jueves	Humedal 1
31/03/2021 9:00:00	1/04/2021 9:00:00	
Jueves	Viernes	
1/04/2021 9:00:00	2/04/2021 9:00:00	
Viernes	Sábado	Humedal 1
2/04/2021 9:00:00	3/04/2021 9:00:00	
Sábado	Domingo	
3/04/2021 9:00:00	4/04/2021 9:00:00	
Domingo	Lunes	Ninguno
4/04/2021 9:00:00	5/04/2021 9:00:00	
Lunes	Martes	
5/04/2021 9:00:00	6/04/2021 9:00:00	
Martes	Miércoles	Ninguno
6/04/2021 9:00:00	7/04/2021 9:00:00	
Miércoles	Jueves	
7/04/2021 9:00:00	8/04/2021 9:00:00	
Jueves	Viernes	Ninguno
8/04/2021 9:00:00	9/04/2021 9:00:00	
Viernes	Sábado	
9/04/2021 9:00:00	10/04/2021 9:00:00	

Sábado	Domingo	Humedal 2
10/04/2021 9:00:00	11/04/2021 9:00:00	
Domingo	Lunes	
11/04/2021 9:00:00	12/04/2021 9:00:00	
Lunes	Martes	Humedal 1
12/04/2021 9:00:00	13/04/2021 9:00:00	
Martes	Miércoles	
13/04/2021 9:00:00	14/04/2021 9:00:00	
Miércoles	Jueves	Ninguno
14/04/2021 9:00:00	15/04/2021 9:00:00	
Jueves	Viernes	
15/04/2021 9:00:00	16/04/2021 9:00:00	
Viernes	Sábado	Humedal 2
16/04/2021 9:00:00	17/04/2021 9:00:00	
Sábado	Domingo	
17/04/2021 9:00:00	18/04/2021 9:00:00	
Domingo	Lunes	Humedal 1
18/04/2021 9:00:00	19/04/2021 9:00:00	
Lunes	Martes	
19/04/2021 9:00:00	20/04/2021 9:00:00	
Martes	Miércoles	Ninguno
20/04/2021 9:00:00	21/04/2021 9:00:00	
Miércoles	Jueves	
21/04/2021 9:00:00	22/04/2021 9:00:00	
Jueves	Viernes	Humedal 2
22/04/2021 9:00:00	23/04/2021 9:00:00	
Viernes	Sábado	
23/04/2021 9:00:00	24/04/2021 9:00:00	
Sábado	Domingo	Humedal 1
24/04/2021 9:00:00	25/04/2021 9:00:00	
Domingo	Lunes	
25/04/2021 9:00:00	26/04/2021 9:00:00	
Lunes	Martes	Ninguno
26/04/2021 9:00:00	27/04/2021 9:00:00	
Martes	Miércoles	
27/04/2021 9:00:00	28/04/2021 9:00:00	
Miércoles	Jueves	Humedal 2
28/04/2021 9:00:00	29/04/2021 9:00:00	
Jueves	Viernes	
29/04/2021 9:00:00	30/04/2021 9:00:00	
Viernes	Sábado	Ninguno
30/04/2021 9:00:00	1/05/2021 9:00:00	
Sábado	Domingo	
1/05/2021 9:00:00	2/05/2021 9:00:00	
Domingo	Lunes	Humedal 1
2/05/2021 9:00:00	3/05/2021 9:00:00	
Lunes	Martes	
3/05/2021 9:00:00	4/05/2021 9:00:00	

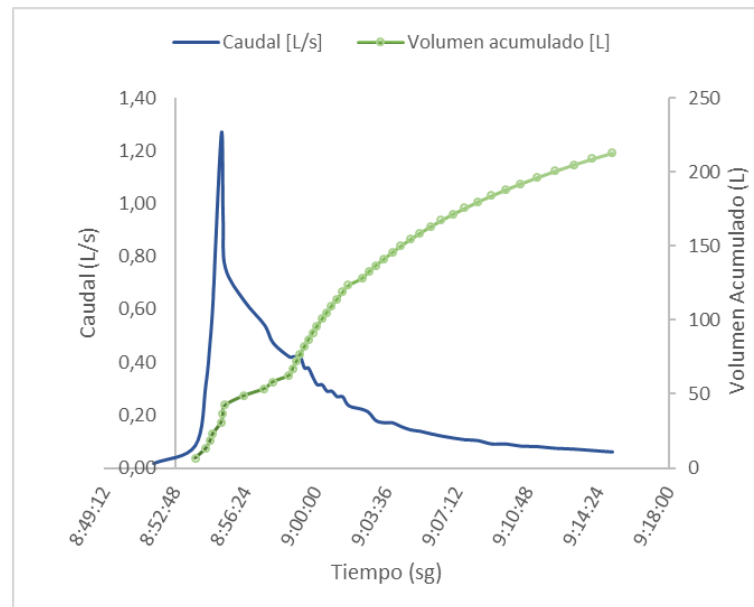
Martes	Miércoles	Humedal 1
4/05/2021 9:00:00	5/05/2021 9:00:00	
Miércoles	Jueves	
5/05/2021 9:00:00	6/05/2021 9:00:00	
Jueves	Viernes	Humedal 2
6/05/2021 9:00:00	7/05/2021 9:00:00	
Viernes	Sábado	
7/05/2021 9:00:00	8/05/2021 9:00:00	
Sábado	Domingo	Ninguno
8/05/2021 9:00:00	9/05/2021 9:00:00	
Domingo	Lunes	
9/05/2021 9:00:00	10/05/2021 9:00:00	
Lunes	Martes	Humedal 1
10/05/2021 9:00:00	11/05/2021 9:00:00	
Martes	Miércoles	
11/05/2021 9:00:00	12/05/2021 9:00:00	
Miércoles	Jueves	Humedal 2
12/05/2021 9:00:00	13/05/2021 9:00:00	
Jueves	Viernes	
13/05/2021 9:00:00	14/05/2021 9:00:00	
Viernes	Sábado	Ninguno
14/05/2021 9:00:00	15/05/2021 9:00:00	
Sábado	Domingo	
15/05/2021 9:00:00	16/05/2021 9:00:00	
Domingo	Lunes	Humedal 1
16/05/2021 9:00:00	17/05/2021 9:00:00	
Lunes	Martes	
17/05/2021 9:00:00	18/05/2021 9:00:00	
Martes	Miércoles	Humedal 2
18/05/2021 9:00:00	19/05/2021 9:00:00	
Miércoles	Jueves	
19/05/2021 9:00:00	20/05/2021 9:00:00	
Jueves	Viernes	Ninguno
20/05/2021 9:00:00	21/05/2021 9:00:00	
Viernes	Sábado	
21/05/2021 9:00:00	22/05/2021 9:00:00	
Sábado	Domingo	Humedal 1
22/05/2021 9:00:00	23/05/2021 9:00:00	
Domingo	Lunes	
23/05/2021 9:00:00	24/05/2021 9:00:00	
Lunes	Martes	Humedal 2
24/05/2021 9:00:00	25/05/2021 9:00:00	
Martes	Miércoles	
25/05/2021 9:00:00	26/05/2021 9:00:00	
Miércoles	Jueves	Humedal 1
26/05/2021 9:00:00	27/05/2021 9:00:00	
Jueves	Viernes	
27/05/2021 9:00:00	28/05/2021 9:00:00	

Anexo 2. Hidrograma de Caudales y volúmenes acumulados



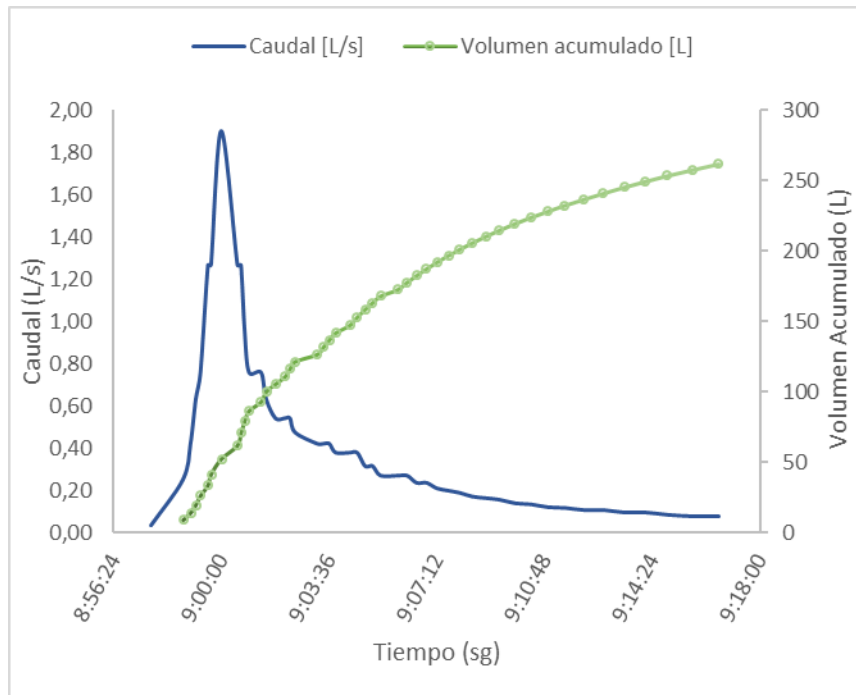
Hidrograma 1 30-01-21

Fuente: Autor propio



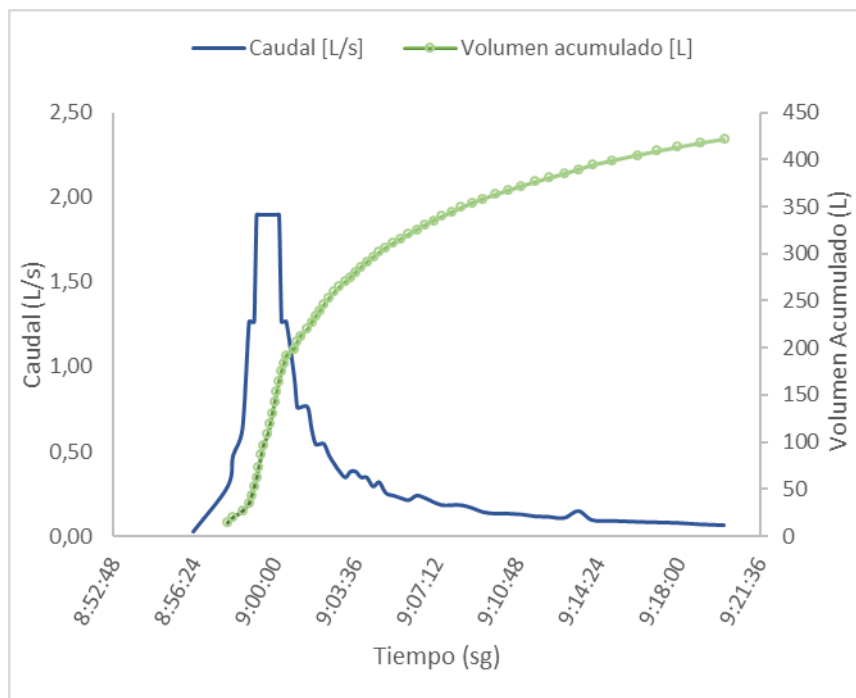
Hidrograma 2 19-02-21

Fuente: Autor propio



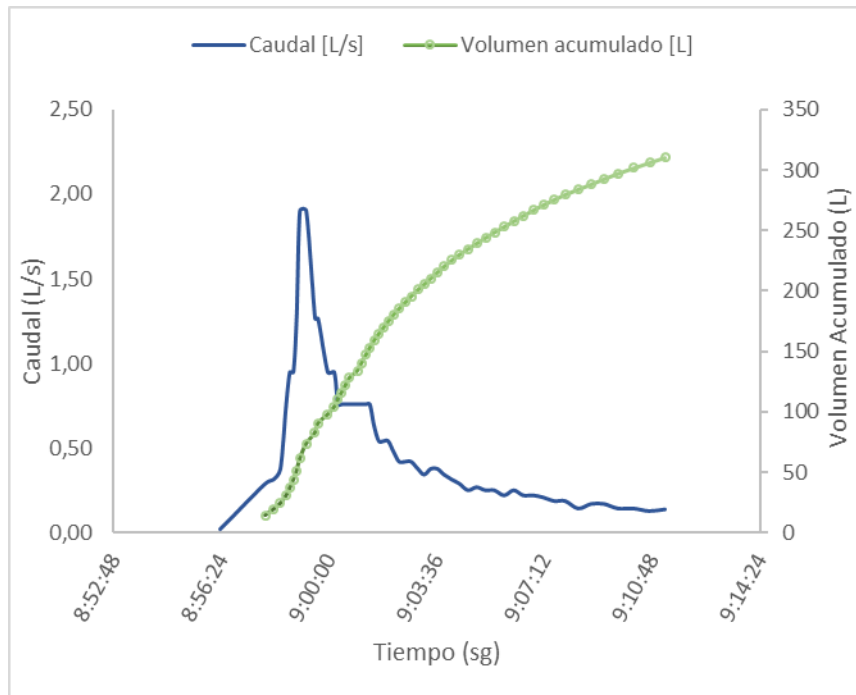
Hidrograma 3 20-02-21

Fuente: Autor propio



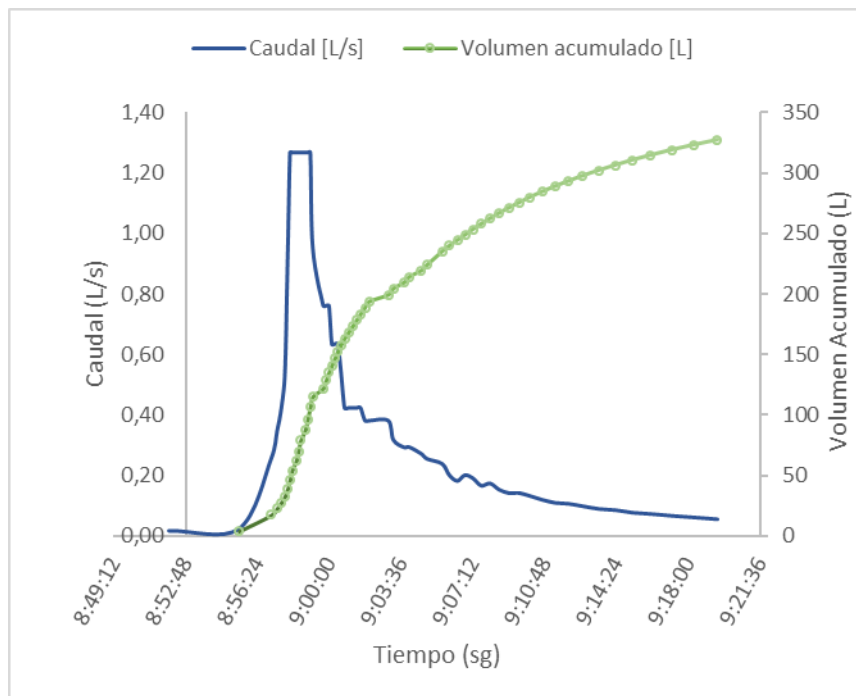
Hidrograma 4 23-02-21

Fuente: Autor propio



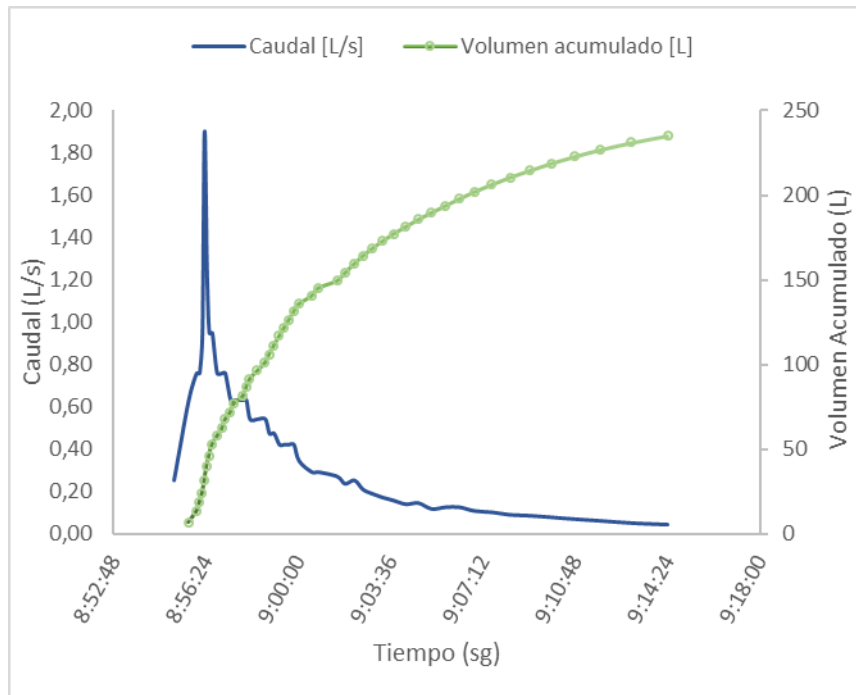
Hidrograma 5 04-03-21

Fuente: Autor propio



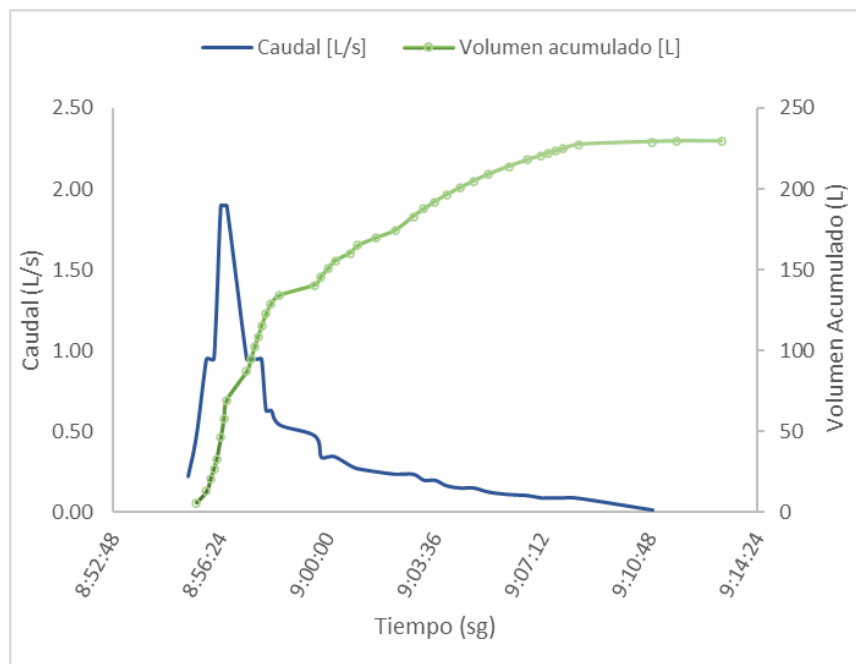
Hidrograma 6 10-03-21

Fuente: Autor propio



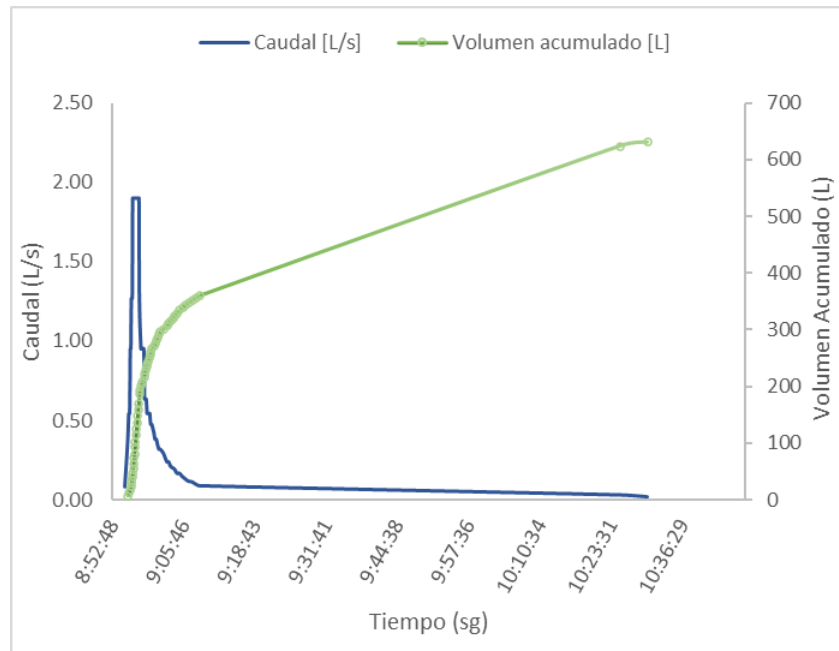
Hidrograma 7 29-04-21

Fuente: Autor propio



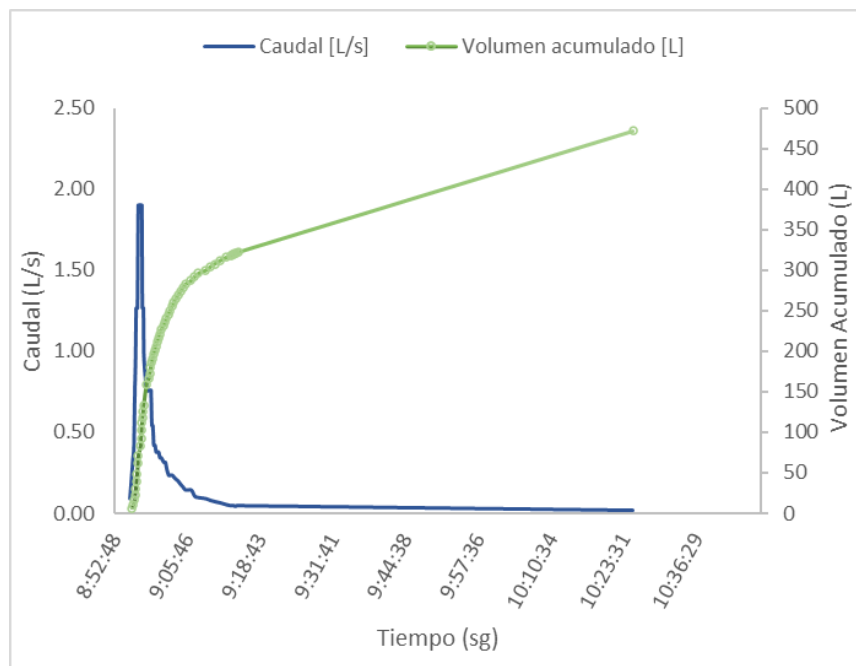
Hidrograma 8 05-05-21

Fuente: Autor propio



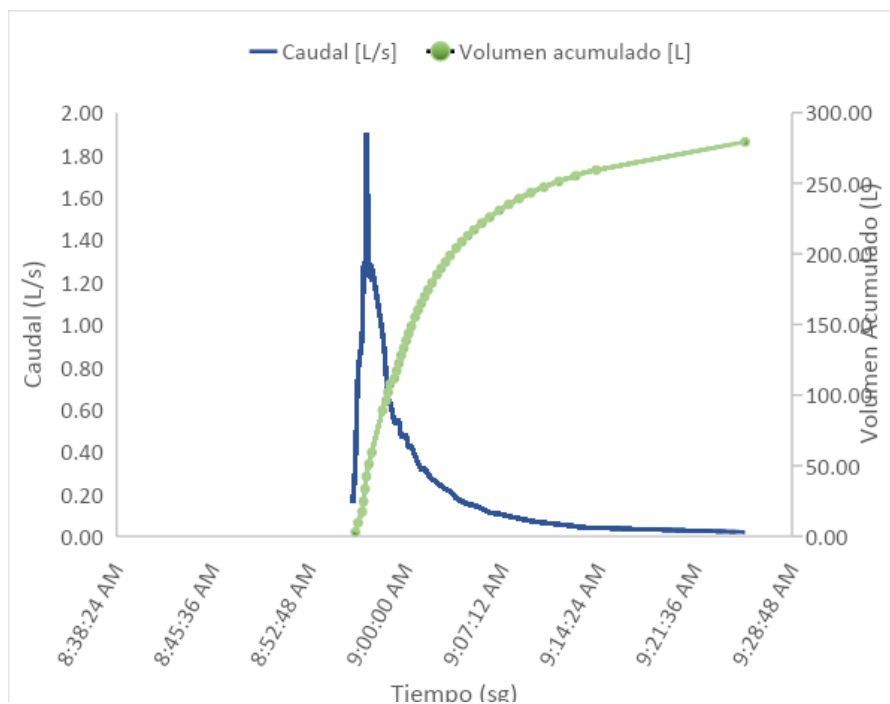
Hidrograma 9 14-05-21

Fuente: Autor propio



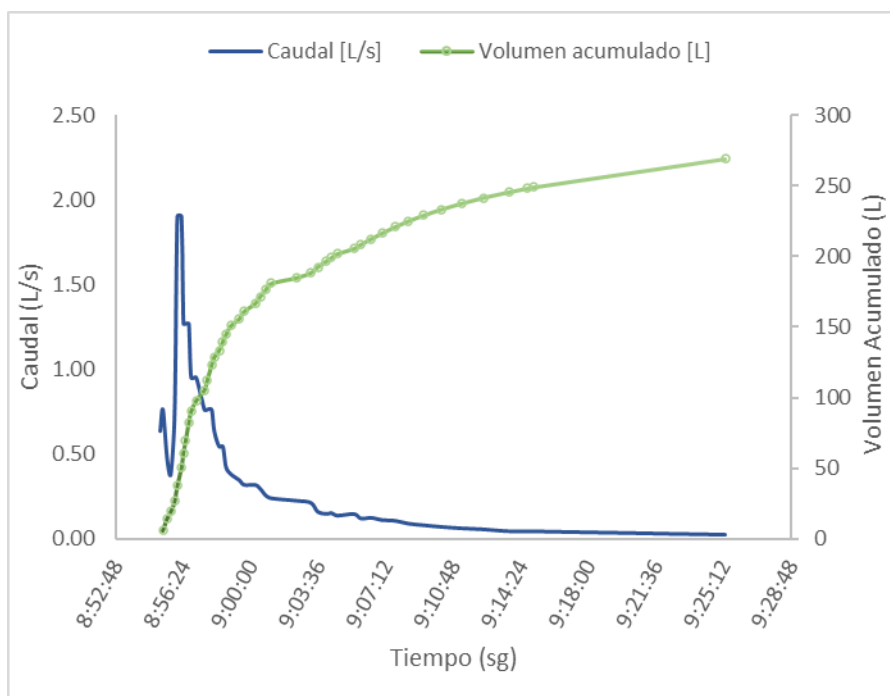
Hidrograma 10 17-05-21

Fuente: Autor propio



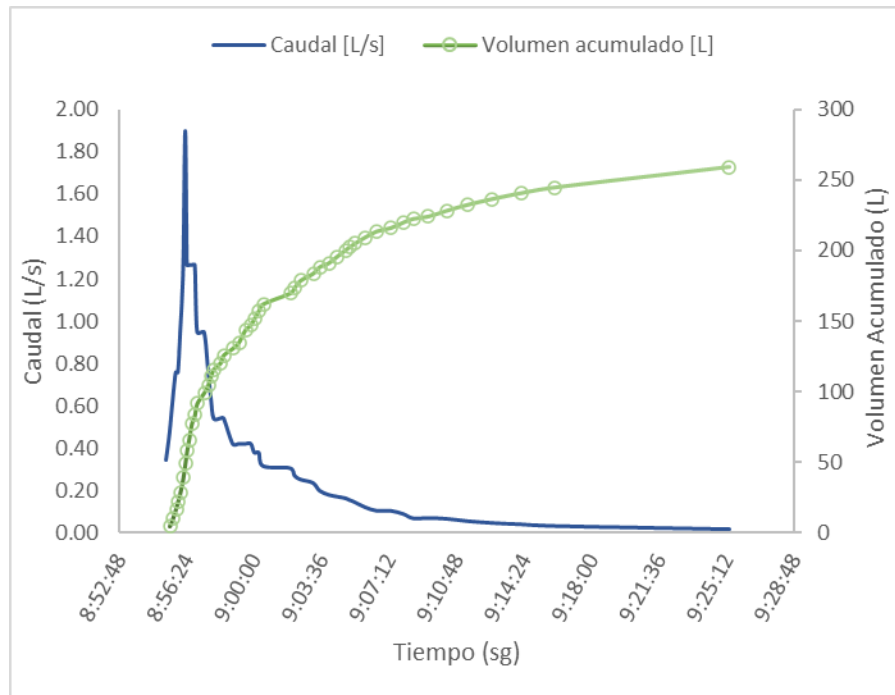
Hidrograma 11 25-05-21

Fuente: Autor propio



Hidrograma 12 26-05-21

Fuente: Autor propio



Hidrograma 13 1-06-21

Fuente: Autor propio