



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN ARQUITECTURA**

**Humedales artificiales elevados, una tecnología sustentable para la reutilización  
del agua gris en centros educativos**

**Prototipo modular de maceta-humedal para la FES Aragón, UNAM**

Tesis

Que para optar por el grado de:

**MAESTRA EN ARQUITECTURA**

Presenta

**EUNISE SARAI FLORES LOZANO**

Tutor:

M. en C. Sergio Alfonso Martínez González

Facultad de Estudios Superiores Aragón

Comité tutor:

M. en Arq. Francisco Reyna Gómez

Arquitectura UNAM

M. en Arq. Jorge Rangel Dávalos

Arquitectura UNAM

M. en I. Mario Sosa Rodríguez

Facultad de Estudios Superiores Aragón

M. en Arq. Maribel Jaimes Torres

Arquitectura UNAM

**Ciudad de México, Noviembre 2016**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

# PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN ARQUITECTURA

Humedales artificiales elevados, una tecnología sustentable para la reutilización del agua gris en centros educativos

Prototipo modular de maceta-humedal para la FES Aragón, UNAM

Tesis para optar por el grado de maestro en arquitectura

Presenta

Eunise Sarai Flores Lozano



### **A mi madre.**

Gracias por creer en mí, por tus sacrificios, enseñanzas y apoyo. Eres un ejemplo de fortaleza y siempre me has animado a luchar por mis metas.

### **A mi padre.**

Gracias por tu apoyo, por tu fe en mis sueños y por enseñarme a creer que nada es imposible si se hacen las cosas con pasión y esmero.

### **A mis hermanos.**

Sé que siempre contaré con su apoyo incondicional. Ustedes son una fuente de orgullo para mí y me inspiran a seguirme superando.

### **A mis sobrinos.**

Con su presencia, ustedes me impulsaron a luchar por esta meta. Sueño con llegar a enorgullecerlos.

### **A mi familia.**

Gracias a ustedes, he tenido la suerte de contar con varios padres y madres que me han llenado de amor y cariño. Querida abuela, eres el ejemplo de que el trabajo duro siempre tendrá una recompensa.

### **A mis amigos.**

Porque nunca me han abandonado y, a pesar de la distancia, sé que siempre podré contar con ustedes.

**A mi tutor, M. en C. Sergio Alfonso Martínez  
Gonzáles.**

Sin sus enseñanzas y apoyo, nada de esto  
habría sido posible.

**A mis sinodales.**

Sus consejos me permitieron finalizar este  
proyecto de la mejor manera.

**A mis profesores.**

Gracias por transmitirme sus  
conocimientos y hacerme crecer como  
estudiante y persona.

**Al Centro tecnológico de FES Aragón.**

Por el apoyo que recibí del personal que labora en  
él y por el préstamo de sus instalaciones y  
herramientas para llevar a cabo la instalación y  
pruebas del prototipo.

**A la vida.**

Por todo lo que me ha brindado, lo bueno  
y lo malo. Todo me ha convertido en una  
persona fuerte y feliz.

## ÍNDICE GENERAL

Introducción	XI
<b>CAPÍTULO I</b>	
Humedales artificiales, una propuesta sustentable y necesaria para mejorar la utilización del agua en las ciudades	1
<b>CAPÍTULO II</b>	
La importancia del agua en la viabilidad de las ciudades	20
<b>CAPÍTULO III</b>	
El déficit de áreas libres en la zona metropolitana del valle de México. La modulación de humedales artificiales como estrategia para su implementación.	37
<b>CAPÍTULO IV</b>	
Prototipo modular experimental de maceta-humedal en la FES Aragón, UNAM	53
Conclusiones y recomendaciones	113
Fuentes	115
Anexos	122

# ÍNDICE

Introducción	XI
<b>CAPÍTULO I</b>	
Humedales artificiales, una propuesta sustentable y necesaria para mejorar la utilización del agua en las ciudades	1
1.1. Estudio comparativo entre humedales naturales y artificiales	2
1.2. Análisis y diseño del sistema de humedales artificiales en la actualidad	4
1.3. Las aplicaciones de los diferentes tipos de humedales artificiales	7
1.3.1. Casos exitosos de implementación de humedales artificiales	11
1.4. La sustentabilidad en los humedales artificiales	14
<b>CAPÍTULO II</b>	
La importancia del agua en la viabilidad de las ciudades	20
2.1. El ciclo del agua en las zonas metropolitanas	21
2.2. Principales problemáticas existentes con respecto a la utilización del agua en las zonas Metropolitanas	24
2.3. Reutilizar agua gris, una forma de disminuir la escasez hídrica en las ciudades	30
2.4. Calidad del agua y parámetros a cumplir para su reutilización	34
<b>CAPÍTULO III</b>	
El déficit de áreas libres en la Zona Metropolitana del Valle de México. La modulación de humedales artificiales como estrategia para su implementación.	37
3.1. El crecimiento de la Zona Metropolitana del Valle de México en las últimas cinco Décadas	38
3.2. Análisis de los tipos y tamaños de los terrenos existentes en la Zona Metropolitana del Valle de México	40
3.2.1. Los centros educativos, ciudades miniatura con influencia en la población	43
3.2.2. Caso de estudio: Facultad de Estudios Superiores Aragón, UNAM	45
3.3. Diseño de un prototipo modular de humedales artificiales: respuesta al déficit de áreas libres, considerando la simplicidad y comodidad de instalación.	47
<b>CAPÍTULO IV</b>	
Prototipo modular experimental de maceta-humedal en la Facultad de Estudios Superiores Aragón, UNAM	53
4.1. Metodología del experimento	53
4.1.1. Instalación del prototipo de maceta-humedal en la azotea del Centro Tecnológico de FES Aragón	57
4.1.2. Alimentación y muestreo del prototipo	59
4.1.3. Selección y listado de pruebas realizadas	62
4.1.4. Procedimientos y seguimiento del prototipo modular de maceta-humedal	63
4.1.5. Resultados de las pruebas	96
4.1.6. Discusión de resultados	110
Conclusiones y recomendaciones	113
Fuentes	115
Anexos	122

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.- Comparación entre los dos diferente sistemas de flujo en un humedal artificial.....	8
Tabla 2.- Ventajas y limitantes del tratamiento de agua por humedales artificiales.....	9
Tabla 3.- Comparativa de funcionamiento de los humedales artificiales sub-superficiales (HASS) respecto a los tres sistemas de tratamiento de agua más empleados.....	15
Tabla 4.- Capacidad de remoción de contaminantes de los humedales artificiales de flujo sub-superficial.....	18
Tabla 5.- Distribución de la reserva de agua dulce en el mundo.....	25
Tabla 6.- Fuentes de abastecimiento de agua potable del distrito federal.....	28
Tabla 7.- Contaminantes importantes de interés en el tratamiento de las aguas residuales.....	32
Tabla 8.- Porcentajes de aguas residuales tratables por humedales artificiales.....	33
Tabla 9.- Límites permisibles de parámetros comparativos, según las normas NOM-001-SEMARNAT-1996, NOM-015-CONAGUA-2007 Y NOM-003-SEMARNAT-1997.....	35
Tabla 10.- Pesos volumétricos de los materiales empleados como sustratos.....	54
Tabla 11.- Matriz de experimentación aplicada sobre las macetas-humedal.....	57
Tabla 12.- Proporción de materiales empleados para la generación del agua gris artificial.....	59
Tabla 13.- Características Generales de Muestras de Agua.....	61
Tabla 14.- Valores aproximados para clasificar el pH en el agua residual.....	84
Tabla 15.- Determinación de la precipitación diaria en FES Aragón.....	92
Tabla 16.- Características Generales de los Muestras de Agua Tratada producida por los prototipos de humedales artificiales.....	92
Tabla 17.- Características Generales de los Muestras de Temperatura.....	93
Tabla 18.- Litros totales de alimentación diarios con los que se contó en los módulos de humedales artificiales.....	106
Tabla 19.- Relación peso-rendimiento que ofrecen los tres sustratos empleados en la elaboración de los prototipos de humedales artificiales.....	109
Tabla 20.- Resumen de resultados de pruebas realizadas en los módulos de humedales artificiales	110
Tabla 21.- Resumen de los resultados de la determinación de los Sólidos Suspendedos Totales y sus componentes.....	110

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.- Triángulo de la sustentabilidad.....	1
Figura 2.- Humedal.....	2
Figura 3.- Componentes generales de los humedales artificiales.....	5
Figura 4.- Comparativa visual entre un humedal artificial de flujo superficial (FWS) y uno de flujo Sub-superficial (SFS).....	8
Figura 5.- Esquematación del edificio Lessor.....	11
Figura 6.- Esquema del funcionamiento del sistema humedales en bidones para tratamiento de agua de los auto lavados.....	13
Figura 7.- Interrelación de las problemáticas del agua.....	24
Figura 8.- Acuíferos contaminados en el país para el año 2009.....	28
Figura 9.- Porcentajes del destino y uso del agua potable en México.....	30
Figura 10.- Porcentaje de utilización del agua dentro de las actividades domésticas de una edificación plurifamiliar intensiva.....	33
Figura 11.- Gráfico de porcentaje de utilización de uso de suelo dentro de la delegación Iztapalapa.....	40
Figura 12.- Gráfico de porcentaje de presencia de los diversos usos de suelo en la delegación Xochimilco.....	40
Figura 13.- Planos de las macetas para prototipo experimental de maceta-humedal.....	51
Figura 14.- Piezas del módulo y juego uniones posibles.....	51
Figura 15.- Imagen ilustrativa de las principales componentes del sistema, así como sus respectivas ubicaciones.....	52
Figura 16.- Alcatraz <i>Zantedeschia aethiopica</i> , empleado en los tres módulos de humedal artificial... ..	56
Figura 17.- Preparación previa de las Macetas A para la primera etapa de la instalación.....	58
Figura 18.- Mangueras y válvulas empleadas en la instalación del prototipo.....	58
Figura 19.- Proceso de limpieza de las plantas.....	58
Figura 20.- Resultado final de la primera fase de instalación de los módulos de humedales artificiales.....	58
Figura 21.- Instalación completa de los tres módulos de humedales artificiales tras la segunda etapa de montaje.....	58
Figura 22.- Pesado de ingredientes para la elaboración de agua gris artificial.....	60
Figura 23.- Módulos de humedales artificiales con sus contenedores individuales de agua de alimentación y salida.....	60
Figura 24.- Proceso de alimentación de los contenedores de entrada de agua a los prototipos.....	60
Figura 25.- Proceso de toma de muestras de agua de los recipientes de salida de agua tratada.....	61
Figura 26.- Viales de DQO con el agua muestra en su interior.....	64
Figura 27.- Agitación de un vial tipo HR.....	64
Figura 28.- Reactor calentando los tubos de reactivo para DBO.....	64
Figura 29.- Colocación de agua muestra dentro de los viales con reactivo.....	66
Figura 30.- Segundo compartimiento en la tapa del vial y su contenido.....	67
Figura 31.- Comparativa visual de los colores del vial antes y después de ser usado.....	67
Figura 32.- Vial Nitrito TNTplus, bajo rango, antes y después de ser usando.....	68
Figura 33.- Tapa del vial Nitrito TNTplus, bajo rango, con su doble compartimiento y su contenido.....	69
Figura 34.- Espectrofotómetro realizando las mediciones de los viales Nitrito TNTplus, bajo rango.....	69

Figura 35.- Materiales empleados en la prueba de Nitrato.....	70
Figura 36.- Vertido del NitraVer X Reagent B en el vial con reactivo.....	70
Figura 37.- Lectura del colorímetro de una muestra del reactivo para detección de Nitrato.....	71
Figura 38.- Materiales utilizados en la prueba de determinación de fósforo total.....	72
Figura 39.- Programación de la medida BLANCO en el colorímetro.....	72
Figura 40.- Vertido del reactivo en polvo dentro de la almohadilla fosfato PhosVer 3.....	73
Figura 41.- Comparativa visual de los colores del agua muestreada antes y después de aplicado el reactivo fosfato PhosVer 3.....	73
Figura 42.- Herramientas y materiales empleados en la prueba de determinación de Sulfatos totales	74
Figura 43.- Pipeteó de la muestra de agua a utilizar para la prueba de Sulfatos totales.....	74
Figura 44.- Almohadilla SulfaVer 4 con reactivo en polvo y su vertido en el interior del frasco con muestra de agua.....	75
Figura 45.- Comparativa visual de los colores de las muestras de agua antes y después de la prueba para determinación de Sulfatos.....	75
Figura 46.- Cápsulas de porcelana a emplear en la prueba de evaporación.....	77
Figura 47.- Estufa de vacío con las cápsulas en su interior.....	78
Figura 48.- Pesado de las cápsulas en báscula analítica digital.....	78
Figura 49.- Calentamiento en la parrilla eléctrica de las cápsulas con agua muestra.....	79
Figura 50.- Cápsulas dentro del desecador.....	79
Figura 51.- Cápsulas dentro de la mufla eléctrica.....	80
Figura 52.- Cápsulas de porcelana tras el proceso de calcinado, su interior se aprecia de tono gris.....	80
Figura 53.- Materiales y Equipo utilizado en la prueba con microfibras filtradoras.....	80
Figura 54.- Filtración de agua destilada para el lavado del filtro.....	81
Figura 55.- Colocación de los crisoles Gooch dentro de la estufa eléctrica.....	81
Figura 56.- Crisoles Gooch dentro del desecador.....	82
Figura 57.- Instalación completa de la bomba de vacío, el matraz Kitasato y el adaptador de hule.....	82
Figura 58.- Pesado de un crisol Gooch en la báscula analítica.....	83
Figura 59.- Crisoles Gooch dentro de la mufla eléctrica.....	83
Figura 60.- Imagen de los crisoles tras salir de la mufla eléctrica.....	84
Figura 61.- Potenciómetro y materiales empleados para la determinación de pH.....	85
Figura 62.- Soluciones empleadas para la calibración del potenciómetro.....	85
Figura 63.- Realización de la lectura de pH del agua muestra.....	86
Figura 64.- Probetas de 100 mL usadas para la prueba de porosidad.....	86
Figura 65.- Probetas listas para iniciar el pipeteó de agua destilada.....	87
Figura 66.- Vasos de precipitado con los sustratos.....	87
Figura 67.- Pipeteó de agua destilada en cada vaso de precipitado.....	88
Figura 68.- Determinación de los pesos de los sustratos secos.....	88
Figura 69.- Botes de ingreso de agua a los humedales artificiales con el agua de la prueba.....	89
Figura 70.- Botes de salida para agua tratada en medio de la prueba de velocidad.....	90
Figura 71.- Poligonal de trabajo referenciada sobre el mapa de curvas de nivel.....	91
Figura 72.- Termómetro higrómetro empleado en el estudio, registrando la temperatura superficial de la azotea del edificio muestra.....	93
Figura 73.- Lectura con el termómetro en la orilla de uno de los módulos de humedal artificial.....	94
Figura 74.- Determinación con el termómetro de la temperatura en el tallo del alcatraz.....	94

Figura 75.- Comparativa entre la valores de DQO presentes en el agua antes y después de ser tratada por los humedales artificiales.....	96
Figura 76.- Comparativa de las cantidades de nitrógeno amoniacal presente en el agua antes y después de ser tratada por los humedales artificiales.....	97
Figura 77.- Comparativa de las cantidades de Nitrato presentes en el agua antes y tras recibir el tratamiento de los humedales artificiales.....	98
Figura 78.- Cantidades de nitrato presentes en el agua antes y después de recibir el tratamiento de los humedales artificiales.....	99
Figura 79.- Resultados de la determinación del Nitrógeno total presente en las muestras de agua.....	100
Figura 80.- Resultados de la determinación de las cantidades de Fósforo total presentes en el agua analizada.....	101
Figura 81.- Cantidades de Fosfatos presentes en las muestras de agua obtenidas de los módulos de humedales artificiales	101
Figura 82.- Resultados de la determinación de Sulfatos presentes en el agua antes de entrar y tras salir de los módulos de humedales artificiales	102
Figura 83.- Cantidades de SST presentes en las muestras de agua y la proporción en porcentajes de SSV y SSF que los conformaron	103
Figura 84.- Resultados y porcentaje de los componentes de los SST cuantificados en la prueba de filtración	104
Figura 85.- Lecturas de pH obtenidas de las muestras de agua analizadas	105
Figura 86.- Cantidad de agua de precipitación diaria que recibe la FES Aragón	107
Figura 87.- Temperatura y precipitación presente en la FES Aragón	107
Figura 88.- Esquema de diferencias térmicas registradas en la instalación de los prototipos de humedales artificiales	108

## Introducción

La escasez hídrica es un problema que se presenta cada vez con mayor fuerza y frecuencia en las grandes ciudades del mundo. En nuestro país, un estudio reciente<sup>1</sup> afirmó que existen 90 millones de personas con esta problemática, de los cuales, 20 sufren escasez severa durante al menos 4 meses al año. Todo esto ha generado conflictos y tensiones entre la población que solo aumentarán al paso del tiempo, a menos de que se comiencen a implementar acciones para solucionar la situación.

La más viable es el uso de sistemas de tratamiento de aguas dentro de los edificios, aminorando así la problemática existente. No obstante, los costos económicos y espaciales que ello representa, sobre todo en las zonas metropolitanas, se convierten en un eje central a considerar dentro del desarrollo de nuevas tecnológicas que pretendan dar solución a la situación existente.

Considerando lo anterior, se decidió estudiar y emplear como base de este trabajo el sistema de humedales artificiales, dado que emplea procesos biológicos en su funcionamiento y por lo tanto, cuenta con mínimos impactos ambientales; además tiene menores costos de instalación y mantenimiento que los sistemas de tratamiento más empleados comercialmente.<sup>2</sup> Sin embargo, el problema que tiene este sistema sigue siendo el área libre requerida para su instalación.

Por todo esto, el objetivo general de este trabajo es generar la adaptación del sistema de humedales artificiales a fin de lograr que su instalación se vuelva técnicamente aplicable a las azoteas de las edificaciones de la Zonas Metropolitana del Valle de México,<sup>3</sup> ello tomando en cuenta las características y limitaciones que ofrece este lugar. Los objetivos particulares de esta investigación son:

- Estudiar y recrear el funcionamiento de los humedales artificiales de flujo sub-superficial en macetas modulares.
- Evaluar las capacidades y limitaciones de remoción de contaminantes que produjo cada uno de los módulos de humedales artificiales a raíz de los sustratos empleados en su elaboración.
- Determinar el tiempo de retención hidráulico<sup>4</sup> que se produjo en los humedales artificiales, así como la cantidad promedio de agua que trataron cada uno.
- Definir el módulo que presentó la mejor relación entre el porcentaje de remoción de contaminantes y la menor carga estructural para el edificio, generando una combinación de materiales idónea para reproducir el sistema en las azoteas de los edificios.
- Cuantificar las ventajas térmicas que proporcionan los humedales artificiales elevados al interior del edificio.

---

<sup>1</sup> M. Mekkonen y A. Hoekstra (2016). *Four billion people facing severe water scarcity* En. Science Advances, vol. 2 (núm. 2).

<sup>2</sup> Los activados, Reactores Aeróbicos y sistemas de lagunaje.

<sup>3</sup> Se utilizó esta ubicación por juzgarla la más ideal con base en el déficit de áreas libres presente en el lugar.

<sup>4</sup> Entendiéndose de esa forma al tiempo que requiere cierta cantidad de agua para entrar en el sistema y salir la misma cantidad ya tratada.

En consecuencia, como parte de este trabajo y con base en las consideraciones y objetivos ya mencionados, se generó un prototipo modular experimental de maceta- humedal con el que se buscó tratar y reutilizar las aguas grises generadas al interior de las construcciones, a fin de minimizar el impacto de la escasez hídrica al interior de estas.

Además, el sistema se moduló a fin de dotarlo con la capacidad de adaptarse a la forma de cualquier área en donde se desee colocarlo y permitir que la instalación pueda crecer o generarse de manera paulatina de acuerdo a las necesidades y/o capacidades económicas de los usuarios. Así mismo, esta característica le proporcionó al sistema el potencial de ser empleado en centros educativos, en donde los cambios administrativos cada cierta cantidad de tiempo hacen difícil el desarrollo de proyectos constructivos de amplio alcance.

Como parte del desarrollo del experimento, se realizó la creación de tres módulos de humedales artificiales elevados con el mismo tipo de contenedor y plantas pero con la variante del sustrato aplicado en cada uno. Lo anterior se realizó a fin de establecer a través de una comparativa de resultados, la combinación de materiales que permita la reproducción del sistema con la menor carga posible, sin mermar las capacidades de remoción de contaminantes del agua del mismo.

La razón para realizar este proceso es que la mayor limitante que presenta la instalación de humedales artificiales en la azotea de los edificios es la carga final del sistema. Por ello, el objetivo del experimento fue determinar cuál sustrato tuvo la mejor relación entre su peso granulométrico y su capacidad para remover o disminuir contaminantes.

Para realizar el diseño del prototipo, se estudió a fondo los tres componentes principales de los humedales artificiales: **contenedor, sustrato y plantas**; a fin de aplicarlos de la mejor forma posible en el prototipo. El motivo para utilizar el sustrato como la variable aplicada entre los módulos de humedales artificiales, es porque al ser el componente que ocupa mayor área interna del prototipo de maceta-humedal, también es el que más influye en la carga final del sistema.

En el caso del contenedor, se desarrolló y usó un módulo conformado por dos piezas hechas a medida en fibra de vidrio. Se usó este material por su reducido peso, maleabilidad, alta capacidad de carga y resistencia a la intemperie. Las plantas que se emplearon fueron alcatraces debido a su accesibilidad, aporte estético, bajo costo y compatibilidad con las características físicas y climáticas del área de estudio.

Los materiales usados como sustrato en los humedales fueron el tezontle rojo, la agrolita y el tepojal. De estos tres, el material más empleado en investigaciones previas<sup>5</sup>, por su alto índice de remoción de contaminantes, es el tezontle rojo. Por ello, se compararon los resultados de los otros dos sustratos con a los de este, para así determinar si eran capaces de igualar o mejorar sus capacidades y características físicas. En esta investigación se contaron con tres hipótesis principales:

---

<sup>5</sup> Márquez Vazquez y Martínez González, Cuaderno de apuntes "fundamentos teóricos para el diseño de Humedales Artificiales, 2011; Lahora, 2003 y Rodríguez Díaz, Salcedo Pérez, Rodríguez Macias, González Eguiarte y Mena Munguía, 2013.

1. Si se elaboran módulos de humedales artificiales elevados de iguales características, con la única variable del sustrato empleado en ellos, se podrá establecer la combinación de materiales idónea para reproducir este sistema con la menor carga total posible
2. El agua tratada por los humedales artificiales elevados, tendrá la calidad suficiente para ser utilizada en el riego de áreas verdes y/o inodoros
3. Al instalar los módulos de humedales artificiales en las azoteas de una edificación, se producirá al interior del mismo, una temperatura menor que la generada superficialmente en la misma azotea.

También se contaron con dos hipótesis secundarias que tuvieron su origen a la base teórica de esta investigación:

1. Tratar y reutilizar el agua gris dentro de los centros educativos, a través del empleo de módulos de humedales artificiales elevados, servirá como ejemplo e influencia para lograr que estudiantes y población en general, conozcan y empleen esta clase de tecnologías.
2. Modulando y reduciendo el peso del sistema de humedales artificiales, éste obtendrá un mayor potencial de utilización en los edificios existentes en las zonas metropolitanas, dado que su instalación será más fácil y podrá realizarse de manera paulatina (y no de manera puntual como ocurre con el resto de los sistemas de tratamiento de agua), permitiendo que se pueda implementar de acuerdo al ritmo y necesidades de cada caso y/o usuario.

Con respecto al capitulado de este trabajo, en el primer capítulo de la tesis se explicó a fondo el tema de los humedales artificiales: ¿qué son? ¿Cómo es su funcionamiento? ¿Cuáles son sus aplicaciones, ventajas, limitaciones y rendimientos?; todo ello se utilizó como base para el diseño del prototipo modular de maceta-humedal propuesto en esta investigación.

El segundo capítulo se utilizó para describir los problemas actuales del agua dentro de las ciudades, los tipos de aguas residuales existentes y los porcentajes empleados en las diversas actividades domésticas. Así mismo, se estableció la calidad de agua necesaria para reutilizar el agua tratada por el sistema.

En el tercer capítulo se estudió brevemente la problemática de espacio existente dentro de la Zona Metropolitana del Valle de México y su origen, así como diversas posibilidades para aprovechar al máximo las áreas libres de los edificaciones y la urbe en general; todo ello con el fin de generar una propuesta de ubicación viable para el sistema dentro de las mismas.

En el cuarto capítulo se explicó el desarrollo del experimento realizado sobre el prototipo de maceta-humedal y los resultados obtenidos. Posteriormente, estos fueron usados como base para realizar la comparativa en cuanto a los índices de remoción de contaminantes del agua, lográndose así establecer o no la validez de las hipótesis propuestas en la investigación.

Finalmente, se incluyó un apartado donde se observan las fuentes empleadas como base de este trabajo y todos los anexos que se creyeron necesarios para lograr la comprensión a fondo de los resultados obtenidos durante el desarrollo de este.

## CAPÍTULO I

### Humedales artificiales, una propuesta sustentable y necesaria para mejorar la utilización del agua en las ciudades

Actualmente, para los personas se están haciendo cada vez más evidentes los problemas ecológicos, de planeación y/o de funcionamiento de los que sufren las grandes ciudades del mundo y nuestro país; y son precisamente los usuarios quienes padecen las consecuencias de estos.

No obstante, para mejorar esta situación es necesario comenzar a generar y aplicar tecnologías sustentables; estas se pueden definir como aquellas que nacen como fruto de considerar y dar igual importancia a los tres principales pilares que envuelven a todas las problemáticas: los factores ambientales, sociales y económicos.



**Figura 1.- Triángulo de la sustentabilidad:** Marca todos los retos y factores a considerar para lograr que una tecnología sea sustentable, dado que los tres factores (económico, ambiental y social) son necesarios pero por si solos no garantizan el nacimiento de un proyecto sustentable. Imagen obtenida con fines didácticos de la página: [www.sustentable.org](http://www.sustentable.org)

Una opción frente a este panorama es el desarrollo y empleo de las tecnologías naturales, es decir, métodos y/o procesos que propician un menor impacto ambiental sin dejar de buscar brindar beneficios sociales y económicos a los usuarios.<sup>6</sup> (Ortiz Moreno, Masera Cerutti y Fuentes Gutiérrez, 2014) Para lograrlo, las eco tecnologías muchas veces se apoyan de la permacultura, la cual según los investigadores Mollison y Slay (2012) podría definirse como “un sistema de diseño para la creación de medioambientes humanos sostenibles” (pág. 5).

<sup>6</sup> Esto es una interpretación personal de lo dicho por los autores.

Una de estas tecnologías naturales son los humedales artificiales, los cuales surgieron como respuesta a diversas problemáticas sociales, ambientales y físicas que se explicarán a detalle en el siguiente apartado.

### 1.1.- Estudio comparativo de humedales naturales y artificiales

Para definir a los humedales artificiales, es importante primero establecer lo que es un humedal. En el año 2002, la Ley Nacional de Aguas afirmó que estos se definen como:

Son las zonas de transición entre los sistemas acuáticos y terrestres que constituyen áreas de inundación temporal o permanente, sujetas o no a la influencia de mareas, como pantanos, ciénagas y marismas, cuyos límites los constituyen el tipo de vegetación hidrófila de presencia permanente o estacional; las áreas en donde el suelo es predominantemente hídrico; y las áreas lacustres o de suelos permanentemente húmedos por la descarga natural de acuíferos.<sup>7</sup> (pág. 2)



**Figura 2.- Humedal.** En la imagen se aprecia este ecosistema encargado de tratar el agua de manera natural. Imagen obtenida con fines didácticos de la página [www.veoverde.com](http://www.veoverde.com).

Considerando lo anterior, se puede definir a un humedal artificial como a una eco tecnología que reproduce en un área designada, las características y el funcionamiento general de un humedal natural<sup>8</sup> (Yocum, 2011). La razón principal para hacer esto es que se busca recrear las capacidades de tratamiento de aguas que posee este ecosistema.

El carácter artificial de este tipo de humedales viene definido por el confinamiento

del humedal, el cual es construido mecánicamente<sup>9</sup> e impermeabilizado para evitar pérdidas de agua al subsuelo<sup>10</sup> (Delgadillo, Camacho, Pérez y Andrade, 2010). Luego se le colocan sustratos diferentes al del terreno original para lograr el enraizamiento de las plantas, cultivando solo

<sup>7</sup> Si bien esta definición es técnicamente correcta, es necesario agregar que estos ecosistemas son los principales encargados del tratamiento del agua dentro de la naturaleza, lo cual logran a través de los diversos tipos de plantas y sustratos que contienen.

<sup>8</sup> Con funcionamiento general se hace referencia a los procesos físicos, biológicos y químicos que ocurren dentro de un humedal y con los que se logra depurar diversos contaminantes presentes en el agua que ingresa en ellos, permitiendo la salida de agua con mejor calidad hacia otros tipos de cuerpos de agua (lagunas, lagos, etc.)

<sup>9</sup> El hecho de que sean construidos mecánicamente permite que sean instalados en donde se necesiten y no solo en las áreas donde existan previamente humedales.

<sup>10</sup> La impermeabilización del terreno es un punto de vital importancia. Si no se realiza correctamente, puede causar contaminación al subsuelo y a los mantos freáticos.

aquellas que han sido previamente seleccionadas para colonizar el humedal<sup>11</sup> (Izembart y Le Boudec, 2003).

Por tanto, son sistemas pasivos de depuración que potencian la descomposición de los materiales degradables contenidos en el agua residual con base en el metabolismo de los microorganismos presentes en el agua, de las características físicas del sustrato y las de las plantas que contenga el sistema<sup>12</sup> (Setty, 2010) Si comparamos a los humedales artificiales contra los naturales, las ventajas de emplear a los primeros como sistemas de tratamiento son:

1. *Menor impacto ambiental:* Dado que se emplean materiales impermeables para garantizar que sean sistemas cerrados, el agua no tiene contacto con el medio ambiente antes de concluir su tratamiento (Arroyo Hernández, 2010).
2. *Creación de nuevos hábitats:* Estos sistemas también se pueden diseñar con el propósito de crear nuevos hábitats para la fauna<sup>13</sup> y la flora o para mejorar la calidad de los humedales naturales próximos. Para ello, se suele incluir en su diseño combinaciones de espacios abiertos y zonas vegetadas e islotes (Delgadillo, Camacho, Pérez y Andrade, 2010).

Por otro lado, emplear un sistema natural como base de un sistema de tratamiento para aguas no es algo nuevo. La capacidad auto depuradora de la naturaleza se conoce desde la antigüedad en Grecia y China (Hoffman, Platzer, Winker y Von Muench, 2011). Sin embargo, no fue hasta la década de los sesenta cuando se empezaron a realizar experimentos en pro de generar sistemas para tratar aguas residuales de diferentes tipos,<sup>14</sup> originando con ello el desarrollo de tres métodos: *El proceso del Instituto Max Plank PIMP o Krefeld System, el proceso de la Zona de Raíz MZR (Root Zone Method) y Proceso Lelystad* (Márquez Vazquez y Martínez González, Cuaderno de apuntes "fundamentos teóricos para el diseño de Humedales Artificiales, 2011).

De estos sistemas, se comprobó que el modelo del Instituto Max Plank era el que presentaba los mejores rendimientos. Por esto, los modelos de humedales que se utilizan actualmente, incluido el modelo que se realizó como prototipo de esta tesis, son evoluciones y perfeccionamientos del método de la Doctora Seidel.

---

<sup>11</sup> Interpretación personal de lo dicho por los autores.

<sup>12</sup> Esto es una interpretación propia de la información mostrada por el autor del artículo.

<sup>13</sup> Esta fauna incluye crías de aves acuáticas, de anfibios, algunos tipos de insectos, etc.

<sup>14</sup> Los tipos de aguas residuales y sus diversas características se explican a detalle en el apartado 2.3.

Este método consiste en un lecho rectangular plantado con carrizos (*Phragmites australis*), en suelos o sustratos seleccionados como son arcilla o arena. El agua residual pretratada mecánicamente fluye bajo la superficie del suelo a través de la raíz de las plantas en forma horizontal. La entrada del afluente se encuentra en un extremo del lecho y el efluente es recolectado en el otro extremo (Water and sanitation program (WSP) for latin america and the Caribbean, 2007).

De este tipo de humedal, el primero construido a escala real y que sigue operativo al día de hoy tratando agua residual doméstica, se realizó en el año 1974 en Othefresen, Europa (Izembart y Le Boudec, 2003, pág. 15).

## 1.2.- Análisis y diseño del sistema de humedales artificiales en la actualidad

Según los investigadores Márquez y Martínez (2011), el diseño de los humedales artificiales se basa en cuatro componentes:

1. Impermeabilización del sistema, ya sea con arcillas o con una película sintética
2. Medio granular o sustrato.<sup>15</sup>
3. Vegetación acuática adecuada ya sea emergente, sub emergente o flotante, según el sistema utilizado y el clima de la zona.
4. Estructuras de entrada y salida de caudal con un sistema de regulación del nivel del agua.<sup>16</sup>

Por otro lado, investigaciones previas sobre los humedales artificiales, indicaron que la figura rectangular es la más propicia en cuanto a remoción de contaminantes, así como para minimizar las áreas de agua estancada que pudieran dañar el funcionamiento hidráulico del sistema y es por tanto la forma que se emplea en los mismos (Hoffman, Platzer, Winker y Von Muench, 2011). Ahora bien, el funcionamiento del sistema se resume en lo siguiente: (Delgadillo, Camacho, Pérez y Andrade, 2010)

- a) El agua a tratar ingresa al humedal artificial a través de una o más tuberías colocadas en la parte superior de uno de los lados más cortos del rectángulo.<sup>17</sup>

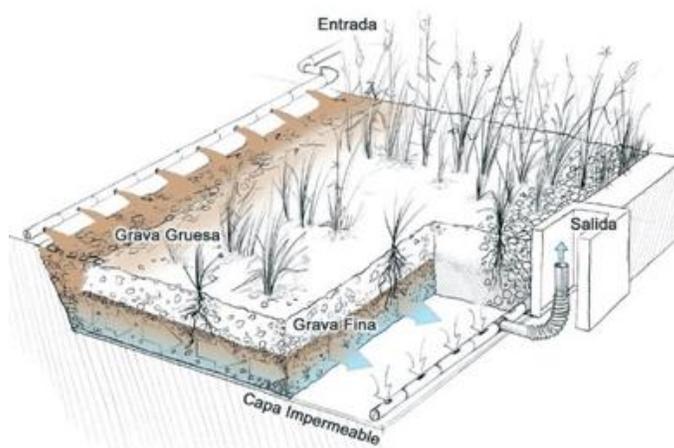
---

<sup>15</sup> El sustrato tiene especial importancia en los sistemas de humedales sub superficiales.

<sup>16</sup> El sistema de los humedales artificiales es de tipo pistón. Cada gota de agua que entra al mismo, debe salir. Por esto las estructuras de regulación del nivel del agua resultan imprescindibles para no sobresaturar al mismo.

<sup>17</sup> Esto se hace con el fin de que el agua haga el recorrido más largo posible dentro de la estructura, generando una mejor calidad de tratamiento para el agua.

- b) Dentro del sistema el agua inicia un recorrido hacia el lado contrario de su lugar de origen, recorriendo todo el sistema. Para garantizar el movimiento del agua es necesario generar una pendiente de bajada hacia el lugar en donde se desea la salida del líquido.
- c) Durante el recorrido, el sustrato, las raíces y los tallos de las plantas colocadas dentro del sistema,<sup>18</sup> se encargan de depurar diversos contaminantes presentes en el agua.<sup>19</sup>
- d) Una vez el agua completa su recorrido dentro del humedal artificial, sale a través de una o varias tuberías colocadas al fondo del lado contrario del de ingreso.
- e) Dependiendo de la calidad que se busque obtener y del uso que se le dará al agua tratada,<sup>20</sup> esta se puede someter o no a otro sistema de tratamiento.



**Figura 3.- Componentes generales de los humedales artificiales.** En el esquema, además de los elementos, se aprecia su correcta ubicación para lograr el funcionamiento deseado. Imagen obtenida con fines didácticos. Autor: Instituto Tecnológico de Canarias, ITC.

A partir de lo anterior, se entiende que las principales variables que determinan los rendimientos finales de los humedales artificiales son:

1. El tiempo de retención hidráulico,<sup>21</sup> el cual a su vez se ve determinado por las características locales de las aguas residuales a tratar, la DBO<sup>22</sup> que se pretenda en el

<sup>18</sup> Las plantas que se utilizan más comúnmente dentro de los humedales artificiales son las hidrófitas.

<sup>19</sup> El tipo y cantidad de contaminantes removidos depende directamente del tipo de sustrato y plantas empleados.

<sup>20</sup> Los usos para el agua tratada son variados y se dividen entre aquellos que tendrán contacto con usuarios y los que no. Dependiendo de lo anterior pueden ir desde consumo humano hasta riego de jardines.

<sup>21</sup> Se le conoce con este término a la cantidad de tiempo que el agua pasa dentro de cualquier sistema de tratamiento de agua, antes de salir nuevamente con la calidad deseada.

<sup>22</sup> Es un parámetro que mide la cantidad de oxígeno consumido al degradar la materia susceptible de ser consumida u oxidada por medio biológicos que contiene una muestra de agua.

efluente, la climatología del lugar, la geometría del sistema y del tipo de humedal aplicado. (Sayadi, Kargar, Doosti y Salehi, 2012)

2. El tipo, peso y granulometría del sustrato o mezcla de sustratos empleados, así como su capacidad para tratar diversos tipos de contaminantes (Ballantine y Tanner, 2010).
3. El tipo de planta empleada, así como su capacidad de oxigenación en el área de las raíces,<sup>23</sup> la velocidad de su crecimiento y su potencial de retención y/o tratamiento de diversos contaminantes (Arroyo Hernández, 2010).<sup>24</sup>

Como se pudo apreciar, el tipo de clima y características físicas existentes en el lugar donde se implementará un humedal artificial, influye mucho en la selección de los materiales y plantas a emplear (Anaya Garduño, Escasez de agua en América Latina y el Medio Oriente. Estudio de casos, problemas y soluciones, 2011). En prácticamente todos los climas de nuestro país se pueden instalar esta clase de sistemas pero se necesita investigar qué tipo de planta y sustrato sería el ideal dependiendo de cada caso. Así mismo, estos materiales deben elegirse teniendo en mente que dentro del humedal artificial se buscará llevar a cabo las siguientes recomendaciones:

1. Incluir en la base del humedal artificial, por debajo de las raíces de las plantas, una cama de veinticinco centímetros o más, ya que esto genera una mayor remoción de contaminantes (Tanner, Sukias y Yates, 2010).
2. Las plantas deben sembrarse de preferencia con una separación de al menos 10 centímetros entre ellas. (Márquez Vazquez y Martínez González, Cuaderno de apuntes "fundamentos teóricos para el diseño de Humedales Artificiales, 2011).

Entonces, a partir de lo anterior se puede postular lo siguiente: *Si se coloca una cama de sustrato con la medida indicada (veinticinco o más centímetros de espesor), el peso y la granulometría del mismo obtiene una mayor relevancia, dado que impacta directamente en la carga final del sistema. Por otro lado, "entre menor sea la granulometría del sustrato, mayor será el tiempo de retención hidráulico que se genere dentro del sistema"* (Hoffman, Platzer, Winker y Von Muench, 2011).

---

<sup>23</sup> La capacidad de oxigenación de las raíces de las plantas ayuda a garantizar el ciclo de vida de las bacterias que viven en la zona y que son parte importante del proceso de descomposición y asimilación de contaminantes por parte del sistema.

<sup>24</sup> Algunos tipos de plantas sirven especialmente para remover determinados tipos de contaminantes. Dependiendo del caso, es importante aprovechar este potencial.

Por todo esto y al ser el componente que se encuentra en mayor cantidad dentro de un sistema de humedales artificiales, la correcta elección del sustrato a emplear se vuelve de vital importancia. Debido a que en esta investigación se buscó adaptar un sistema modular de macetas humedales en la azotea de edificios para proveerlos de un sistema de tratamiento de aguas grises biológico, la selección del sustrato se volvió el eje central en el afán de convertir el prototipo desarrollado en esta tesis en algo realmente aplicable a las edificaciones. Esto a fin de la carga total del sistema no sobrepase la capacidad de carga de las estructuras de los edificios para garantizar la seguridad de los usuarios.

A consecuencia de lo anterior, la matriz del experimento así como la hipótesis principal de la investigación se centró en este punto. También, con base en toda la información ya expuesta, la figura base que se utilizó para el desarrollo del modelo del prototipo fue rectangular, cuidando que este cumpliera con todas las recomendaciones y características ya antes descritas.

### 1.3.- Las aplicaciones de los diferentes tipos de humedales artificiales

De acuerdo a su diseño, a las necesidades del proyecto y al tipo de flujo que presenta el agua en ellos, existen dos tipos de sistemas que pueden emplearse:

1. ***Humedales de Flujo Superficial o libre (FWS)***: En estos se intenta imitar la forma de los humedales naturales y por ello cuentan con una capa de agua sobre la que sobresalen los tallos de las plantas cultivadas en él. El tratamiento se produce durante la circulación del agua a través de los tallos y raíces de la vegetación emergente (Castro Reis, 2012). Su costo suele ser menor debido a que se utiliza menos sustrato para elaborarlos pero pueden desprender malos olores durante el proceso de tratamiento de agua y/o convertirse en lugares de incubación de mosquitos (Agudelo, Jaramillo, Peñuela y Aguirre, 2010).
2. ***Humedales de Flujo Sub-superficial (SFS)***: En este diseño el medio granular o sustrato es el elemento principal donde se generan la mayoría de los procesos necesarios para el tratamiento del agua;<sup>25</sup> (Arroyo Hernández, 2010) por ello, se procura que su nivel siempre sea mayor al del agua, lo que aumenta los costos pero también da seguridad ya que evita la

---

<sup>25</sup> En este diseño, es en el sustrato donde se genera la sedimentación de los materiales en suspensión contenidos en el agua y la subsecuente descomposición de la materia orgánica. Además, en él se genera una biopelícula (estructura colectiva de microorganismos que se adhiere a la superficie y que está revestida por una capa protectora segregada por los propios microorganismos) encargada de neutralizar a los agentes patógenos, así como de la transformación y asimilación de los nutrientes presentes en el agua.

generación de insectos y malos olores. Estudios previos demostraron que debido al mayor nivel de sustrato, estos humedales poseen mayor capacidad de remoción de contaminantes que los de flujo superficial (Molleda Martínez, 2011)



**Figura 4.- Comparativa visual entre un humedal artificial de flujo superficial (FWS) y uno de flujo Subsuperficial (SFS).** En esta imagen se puede apreciar como los dos tipos de humedales artificiales se pueden distinguir visualmente de manera fácil; mientras uno podría fácilmente confundirse con humedal natural (FWS), el segundo (SFS), colocado en campo abierto se mezcla como un simple conjunto de plantas, en este caso carrizos.

Imágenes obtenidas con fines didácticos desde las páginas [www.ciudadania-express.com](http://www.ciudadania-express.com) y <http://www.biocharireland.com>

Tabla 1.- Comparación entre los dos diferente sistemas de flujo en un humedal artificial		
Factor evaluado	Flujo superficial	Flujo Subsuperficial
Tratamiento	Sirven para flujos secundarios (aguas ya tratadas por otros medios, Ej. lagunas, biodiscos, lodos activados, etc.)	Sirven para flujos primarios (aguas pre tratadas, ej. Tanques IMHOFF, pozos sépticos)
Carga orgánica recomendada	Opera con baja carga orgánica	Puede manejar altas tasas de carga orgánica
Olor	Puede ser controlado	No existe
Insectos	El control es caro	No existe
Resistencia a cambios de temperatura	Mala, las bajas temperaturas afectan al proceso de remoción	Buena. Por la acumulación de restos vegetales y el flujo subterráneo, el agua mantiene una temperatura casi constante
Área	Requieren superficies de mayor tamaño	Requieren superficies de menor tamaño
Costo	Menor en relación al sub superficial	Mayor costo debido al material granular que puede llegar a incrementar el precio hasta un 30%
Valor biológico	Mayor valor como ecosistemas para la vida salvaje, el agua es accesible a la fauna	Menor valor como ecosistema para la vida salvaje ya que el agua es difícilmente accesible a la fauna

Usos generales	Son de restauración y creación de nuevos ecosistemas	Tratamiento de aguas residuales, principalmente para casas aisladas y núcleos menores de 200 habitantes
Operación	Son tratamientos adicionales a los sistemas convencionales (usados para tratamiento terciario y mejoramiento de la calidad del agua)	Pueden usarse como tratamiento secundario

Fuente: Delgadillo , Camacho, Pérez , & Andrade, 2010

Tras entender el funcionamiento de los dos tipos de humedales artificiales, se concluyó que si se pretende instalar este sistema a las zonas urbanas, el modelo más recomendable a emplear es el de flujo sub superficial, y por ello, fue el que se usó como base del prototipo de esta investigación

Por otro lado, este sistema presenta ventajas y limitantes propias que se deben tener en cuenta antes de decidir implementarlo. Los principales se han enlistado en la siguiente tabla.

Tabla 2.- Ventajas y limitantes del tratamiento de agua por humedales artificiales	
Ventajas	Desventajas
Poseen un diseño relativamente sencillo	Se necesitan áreas libres para su instalación
No requieren ningún tipo de energía fósil o tecnología especializada para realizar el tratamiento del agua	El tiempo que tarda en realizarse el tratamiento del agua es mayor que en otros sistemas, pudiendo abarcar desde horas hasta días
Debido a lo anterior, sus costos de instalación y funcionamiento son menores que la mayoría de los sistemas de tratamiento	El sistema solo puede tratar aguas grises y/o sin contenido de desechos sólidos, pues estos pueden obstruirlo y dañarlo
Requieren un mantenimiento mínimo y sin personal especializado	Es necesario incluir tratamientos previos al humedal que separen los sólidos de los líquidos
En cuanto a la remoción de contaminantes, presentan rendimientos estables todo el año	Los costos aumentan debido a que se requiere personal especializado para generar el diseño e instalación de estos sistemas. Cada proyecto se debe realizar de manera individual, estudiando las características y necesidades de cada uno
Son resistentes a las variaciones de afluente* y poseen gran adaptabilidad	
Son capaces de remover agentes patógenos del agua	Si con el tiempo, la cantidad de efluente o contaminantes para los que fue diseñado un humedal artificial aumentan, resulta difícil aumentar la capacidad de tratamiento del sistema. Resulta más viable agregar otro sistema extra a la línea de tratamiento
Los lodos que se producen como resultado del tratamiento del agua, son primarios y pueden ser degradados fácilmente por los mismos microorganismos	

\*Se le conoce de esta manera a la cantidad de agua que entra al sistema para ser tratada.

**Fuentes:** La información expuesta se basó en: M. Márquez y S. A. Martínez (2011). Cuaderno de Apuntes “Fundamentos Teóricos para el Diseño de Humedales Artificiales”. Trabajo derivado del subproyecto PAPIME EN105103 con título “Diseño, construcción, arranque y operación de modelos piloto de procesos biológicos unitarios para tratamiento de aguas residuales”; K. Setty (2010). Manual de Construcción: Humedales construidos para el tratamiento de aguas negras. Bren School of Environmental Science and Management, University of California, Santa Bárbara; M. Márquez. (2004) Diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales para la escuela nacional de estudios profesionales Aragón, empleando eco tecnologías (humedales artificiales) (pp. 184-187) Tesis de licenciatura en Ingeniería Civil, UNAM ENEP Aragón. Ciudad de México, México.

Cabe mencionar que en consideración de todo lo anterior, uno de los principales potenciales de aprovechamiento de estos sistemas es que se pueden combinar los humedales artificiales con las plantas de tratamiento ya existentes (Metcalf & Eddy, Burton L, Tchobanogluos y Stensel, 2003).

Esto se debe a que en muchos lugares, a causa del crecimiento de las ciudades, existen plantas de tratamiento que ya no cumplen sus objetivos de tratamiento por contar con cargas mayores de para las que fueron diseñadas. En estos casos, el construir nuevas plantas de depuración o el conectarse con las existentes implica un elevado costo, y así, la opción antes mencionada se convierte en una alternativa económica y ecológicamente aceptable.

Por otro lado, a partir de lo expuesto en la tabla 2 se puede concluir que las aplicaciones ideales para el sistema son: (Delgadillo, Camacho, Pérez y Andrade, 2010)

- a) Tratamiento de aguas residuales municipales
- b) Tratamiento de aguas residuales domésticas o aguas grises
- c) Tratamiento terciario de efluentes pre tratados en plantas convencionales de aguas residuales
- d) Tratamiento de aguas residuales industriales (como lixiviados de rellenos sanitarios, tratamiento de lodos, desechos agrícolas, etc.)
- e) Tratamiento y retención de aguas pluviales
- f) Tratamiento natural de ríos y lagos contaminados.

Esta investigación se enfocó especialmente al segundo tipo de aplicación, por ello, se investigaron diversos casos homólogos, a fin de estudiar cómo se llevó a cabo la instalación del sistema así como para establecer los parámetros de resultados que generados en el tratamiento de aguas grises, Los casos más representativos se explican en los apartados siguientes.

### 1.3.1.- Casos exitosos de implementación de humedales artificiales

#### 1. Sistema de humedales artificiales sub-superficiales aplicados para tratamiento de aguas residuales y aguas pluviales : Edificio Lessor, Alemania (Izembart y Le Boudec, 2003)<sup>26</sup>

En Copenhague, Alemania, la empresa Lessor construyó para la nueva sede de la compañía un impresionante edificio que cuenta con un mínimo consumo de energía y de impacto ambiental. Para lograrlo se aplicaron en él muchos tipos de eco tecnologías pero la más importante fue la de



**Figura 5.- Esquematización del edificio Lessor.** En este boceto se puede apreciar la forma y ubicación tanto del edificio principal como del humedal artificial que lo rodea. Imagen obtenida con fines didácticos.  
Autor: Izembart & Le Boudec, 2003.

los humedales artificiales, ya que permitió que la edificación fuera autónoma en el tema del agua y sin conexión a la red de agua potable o a la de drenaje.

Esto se consiguió a través del empleo de dos sistemas de humedales artificiales sub-superficiales independientes. El primero rodea al edificio y se encarga de tratar el agua pluvial que deja caer en él los techos inclinados del mismo; esta agua una vez tratada se usa en el interior de la construcción.

El segundo se encuentra a lo largo de uno de los perímetros del terreno y se encarga de tratar el agua residual del edificio para reutilizarla en el riego del resto de los jardines. Como resultado se debe apuntar que aunque los humedales necesitan un par de años para funcionar plenamente;<sup>27</sup> el sistema mostró una eficacia de un 75% en la remoción de contaminantes durante el primer año de funcionamiento del edificio. Sin embargo, probablemente el aporte más importante que del caso es el hecho de que aunque el edificio solo dependía de los humedales artificiales para cubrir sus necesidades hídricas, este pudo funcionar sin mayores problemas, mostrando con ello el enorme potencial que ofrece esta eco tecnología.

<sup>26</sup> Lo mostrado es un resumen de lo mostrado por los autores en su libro.

<sup>27</sup> Este período se refiere al tiempo que requieren las plantas colocadas en el sistema para su crecimiento pleno.

2. *Humedal piloto de flujo Horizontal en el estado de Morelos*<sup>28</sup> (Romero, Colín, Sánchez y Ortiz, 2009)

En el Instituto de Química de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos, se realizó un experimento para establecer los parámetros de funcionamiento de un prototipo conformado por tres recipientes de fibra de vidrio,<sup>29</sup> conectados en forma secuencial con una pendiente del 1% y en los que se desarrollaron humedales artificiales sub-superficiales.<sup>30</sup> El objetivo era determinar la capacidad de tratamiento de la Demanda Biológica de Oxígeno<sup>31</sup> por cada uno de los módulos de manera individual y la generada de forma global.

Antes de realizar los muestreos se permitió un período de estabilización de los humedales de tres meses. Los resultados obtenidos demostraron que el tiempo de retención hidráulico máximo para el sistema era de cinco días, dado que después de ese período, se comenzaba a presentar un incremento en la Demanda Química de Oxígeno.<sup>32</sup>

El tratamiento de la materia orgánica fue mayor en el sistema global que en cada uno de los módulos, presentando como la menor concentración 50 mg/L, lo que marcó una remoción de la carga orgánica mayor al cincuenta por ciento con respecto a la concentración inicial con la que contó el agua.

En el caso de esta investigación, la aportación de este trabajo hacia la presente investigación, fue el hecho de demostrar que un sistema de humedales artificiales, conectado de manera secuencial presentaba muy interesantes resultados en cuanto a sus parámetros de funcionamiento, así mismo, sirvió como base para determinar las medidas finales que tendría el prototipo de esta investigación y la pendiente a emplear para garantizar el movimiento del agua.

---

<sup>28</sup> La información de este artículo me interesó particularmente debido a que se trata de un sistema colocado en nuestro país con condiciones similares a las que se presentaron en el caso de estudio y por tanto plantea parámetros que se tomaron en cuenta en el diseño del prototipo y el experimento

<sup>29</sup> Las dimensiones de los módulos de fibra de vidrio fueron: 0.8 m. de alto, 0.6 m. de ancho y 0.9 m. de largo.

<sup>30</sup> Para los humedales se utilizó como sustrato tezontle rojo y arena en una proporción 1:1. Las plantas fueron carrizo y tule.

<sup>31</sup> Es una estimación de la cantidad de oxígeno que requiere una población microbiana heterogénea para oxidar la materia orgánica de una muestra de agua en un determinado período de tiempo. Fuente: CONAGUA (2010) *NMX-AA-028-SCFI-2001; Análisis de agua - Determinación de la demanda Bioquímica de oxígeno en aguas naturales, residuales y residuales tratadas – método de prueba*. Disponible en la página Web de CONAGUA

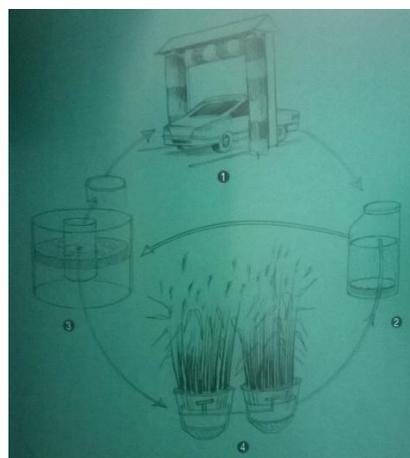
<sup>32</sup> Es la cantidad de materia orgánica e inorgánica en un cuerpo de agua que es susceptible de ser oxidada por un oxidante fuerte. Fuente: CONAGUA (2010) *NMX-AA-030-SCFI-2001; Análisis de agua - Determinación de la demanda Química de oxígeno en aguas naturales, residuales y residuales tratadas – método de prueba*. Disponible en la página Web de CONAGUA

3. *Sistema de Humedales Artificiales Sub-superficiales en bidones para tratamiento de aguas grises en un autolavado* (Izembart y Le Boudec, 2003)<sup>33</sup>

De este tipo de instalación existen varios ejemplos en Suecia, Alemania y Dinamarca. Consiste en una mini depuradora conformada por piezas individuales de humedales artificiales sub-superficiales desarrollados dentro de bidones o barriles de metal<sup>34</sup> que se colocaron en auto lavados para tratar y reutilizar el agua que utilizan.

En este procedimiento, cuando el agua ya ha sido empleada por el local, esta se pasa por un filtro que sedimenta los aceites y diversos químicos; después el agua se ingresa a dos bidones con humedales artificiales para recibir la mayor depuración de contaminantes.<sup>35</sup> El tercer paso es ingresar el agua a un clarificador<sup>36</sup> y finalmente esta se puede volver a utilizar en el mismo autolavado.

El principal aporte de este caso es la demostración de que esta clase de piezas son una opción viable para bajar el consumo de agua potable y la escasez hídrica en diversos locales, sin dejar de garantizar el funcionamiento del mismo. El desarrollo de humedales dentro de diversos tipos de contenedores no es un procedimiento demasiado complicado o costoso, por lo que el sistema puede ser replicable y aplicable a diversos casos en México.



**Figura 6.- Esquema del funcionamiento del sistema humedales en bidones para tratamiento de agua de los auto lavados.** En la imagen se aprecia de manera gráfica el funcionamiento del sistema observado a grosso modo la apariencia de cada una de las piezas que lo conforman. Figura obtenida con fines didácticos. Autor: Izembart & Le Boudec, 2003.

<sup>33</sup> Lo mostrado es un resumen de lo mostrado por los autores en su libro.

<sup>34</sup> El bidón se llena con gravilla, luego se le coloca 20 centímetros de sustrato y en este se siembran carrizos.

<sup>35</sup> Los contaminantes se convierten en sedimento dentro de la gravilla, al fondo de los bidones. Cada pieza de humedal tiene un tiempo de vida de entre cinco a diez años antes de llenarse completamente.

<sup>36</sup> Maquinas que separan los sólidos de un líquido por medio de la gravedad, permitiendo menos turbiedad en el agua.

4. *Sistema piloto de humedales artificiales de flujo superficial en Antioquia, Colombia* (Agudelo, Jaramillo, Peñuela y Aguirre, 2010)<sup>37</sup>

En la zona rural del municipio de Guarne (Antioquia), Colombia, se realizó la creación de dos humedales artificiales con medidas, parámetros de funcionamiento, sustratos y plantas similares,<sup>38</sup> siendo uno de flujo superficial y el otro de sub-superficial. Ambos se instalaron con la finalidad de servir como tratamiento secundario para las aguas generadas dentro de un establecimiento comercial.

El objetivo del experimento era comparar la capacidad depuradora de los dos tipos de humedales artificiales a fin de establecer cuál de los es más eficiente y aplicable para las zonas urbanas.

Finalmente tras varios muestreos se determinó que el humedal de flujo sub-superficial mostraba una ligera superioridad en su capacidad de remoción de contaminantes con respecto al otro.<sup>39</sup> Sin embargo, el motivo por el cual los investigadores terminaron por concluir que este tipo de humedal artificial era el idóneo para emplearse en zonas urbanas, fue el hecho de que estos no permiten el desarrollo de malos olores o mosquitos.

#### 1.4.- La sustentabilidad en los humedales artificiales

En la actualidad existe una confusión sobre el significado y aplicación de los términos de sostenible y sustentable. El primero se empezó a emplear por el Programa de las Naciones Unidas (Moreno Pérez, 2007), y se refiere más que nada a cuando una tecnología<sup>40</sup> en base a los recursos naturales, sociales y/o económicos puede permanecer por mucho tiempo de manera estable y cumpliendo con el objetivo con el que fue creada. (Acosta, 2009)

Por otra lado, el termino sustentabilidad implica un desarrollo que busque amplios beneficios, respondiendo a una visión sistémica y mundializada puesto que el medio ambiente es uno y el mismo para todos en el planeta (Hernandez Moreno, 2008). También sustentable se usa

---

<sup>37</sup> El texto mostrado es un resumen del artículo realizado por los autores. Se debe tener en consideración que la verdadera aportación de este artículo resulta en que sus resultados son obtenidos de la colocación de humedales artificiales en una edificación real para entender su funcionamiento aplicado.

<sup>38</sup> Un caudal de entrada del agua a tratar de 60 L/s y un tiempo de retención hidráulico de cinco días. Las dimensiones fueron: 2.0 m. de largo, 1.0 m de ancho y 0.6 m. de profundidad. Como sustrato se empleó grava fina y gruesa y se plantaron carrizos y bijaos a cada 25 centímetros.

<sup>39</sup> En la comparativa, el humedal con flujo superficial se produjo una remoción del 92.5% de la DBO y en el sub-superficial fue de 94.5%

<sup>40</sup> Lo mismo aplica para cualquier clase de proyecto, edificio, o similar.

para definir un desarrollo equitativo para todos en la sociedad, incluyendo a las generaciones futuras, con total cuidado de la naturaleza, con políticas y procedimientos de gestión participativa y transparente que superen a la democracia formal actual (Trebilcock, 2009).<sup>41</sup> Los pilares básicos en los que se debe fundamentar la arquitectura sustentable son: (Serrano Dina, 2012)

1. Optimización de los recursos y materiales
2. Disminución del consumo energético y fomento de energías renovables
3. Disminución de residuos y emisiones
4. Disminución del mantenimiento, explotación y uso de los edificios
5. Aumento de la calidad de vida de los ocupantes de los edificios

Con base en lo anterior, se considera que esta investigación pertenece al tipo de sustentable, dado que los objetivos de esta, tienen más en común con las definiciones de este término. Ahora bien, utilizar una estructura natural como base de un sistema de tratamiento para aguas es una idea que tiene en si misma cierto perfil de sustentabilidad pero que no es nueva.

La capacidad auto depuradora de la naturaleza es la base de todos los métodos de tratamiento conocidos como procesos biológicos; en estos el tratamiento depende de bacterias, nematodos y otros pequeños organismos que descomponen los residuos orgánicos mediante procesos celulares normales (Arroyo Hernández, 2010).

Dentro de esos sistemas, los más empleados son los de Reactores Aerobios, lodos activados y el sistema de Lagunaje. Por ello, se realizó una comparativa de los humedales artificiales de flujo sub-superficial,<sup>42</sup> con respecto a estos, a fin de establecer sus ventajas y limitantes.

Tabla 3.- Comparativa de funcionamiento de los humedales artificiales sub-superficiales (HASS) respecto a los tres sistemas de tratamiento de agua más empleados	
HASS respecto a los Sistemas de lagunaje	
Ventajas	Desventajas
Requieren menos área de instalación para generar rendimientos similares	Los sistemas lagunares son más fáciles de diseñar y construir
No tienen superficies libres de agua y por ello no fomentan la cría de mosquitos	Las lagunas no necesitan sustrato y tienen menores costos de inversión
Producen agua clara, mientras que las lagunas tienen una alta producción de algas que incluye en la calidad del efluente y complican la reutilización del agua	Para plantas de tratamiento a gran escala de más de 10 000 personas y en lugares donde los terrenos son económicos, las lagunas resultan más económicas

<sup>41</sup> Lo escrito es una interpretación personal de lo dicho por el autor.

<sup>42</sup> El cual se estableció sería el que modelo a utilizar como base del prototipo.

No presentan variaciones de rendimiento entre verano e invierno, al contrario de los sistemas lagunares	
Los humedales artificiales cuentan con una mejor integración al paisaje, ya que a diferencia de las lagunas, no presentan materia en suspensión en el efluente, como algas o flictoplanton y no producen malos olores	
<b>HASS respecto a los Reactores Aeróbicos</b>	
<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
Eliminan patógenos, incluso más que los procesos convencionales de tratamiento aerobio	El tiempo del tratamiento del agua es mayor en los humedales
Los humedales artificiales tienen costos de operación y mantenimiento significativamente más bajos comparándolos con los procesos de tratamiento aerobio de carga alta por el uso de energía y el tiempo de operación	Los costos en un humedal de gran tamaño son mayores, por lo que son recomendables para poblaciones de hasta 500 personas.
No producen lodos, en cambio las plantas aeróbicas se caracterizan por la alta tasa de producción de lodo secundario, el cual debe ser retirado, tratado y depositado adecuadamente, aumentando aún más los costos.	Debido a que los humedales artificiales no pueden tratar aguas con desechos sólidos, no pueden ser utilizados como sistema de tratamiento primario
<b>HASS respecto a los Tratamientos de lodos activados</b>	
<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
Los humedales artificiales tienen menores costos de instalación, mantenimiento y funcionamiento, al no necesitar energía eléctrica	Los humedales artificiales tienen mayor tiempo de retención hidráulico
Los humedales artificiales soportan bien las variaciones de caudal, al contrario de los lodos activados	Debido a que los humedales artificiales no pueden tratar aguas con desechos sólidos, no pueden ser utilizados como sistema de tratamiento primario
Su implementación tiene un menor impacto económico y ecológico, además de causar menores inconvenientes a la población que vive cerca de estos	Las plantas de lodos activados, son capaces de tratar una cantidad de agua mayor. Para que los humedales pudieran compararse, su tamaño tendría que ser muy grande, aumentando los costos de instalación y volviéndolos inviables
No producen ruido ni malos olores	

**Fuentes:** O. Delgadillo, A. Camacho, L. F. Pérez y M. Andrade (2010) Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales. Centro Andino para la gestión y el uso del agua (Centro AGUA); Dra. H. Hoffman, Dr. Platzer, Dra. M. Winker y Dra. E. Muench (2011). Revisión técnica de humedales artificiales de flujo subsuperficial para el tratamiento de aguas grises y aguas domésticas. Agencia de cooperación Internacional de Alemania, GIZ. Programa de saneamiento sostenible ECOSAN; M. Márquez. (2004) Diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales para la escuela nacional de estudios profesionales Aragon, empenado eco tecnologías (humedales artificiales) (pp. 184-187) Tesis de licenciatura en Ingeniería Civil, UNAM ENEP Aragón. Ciudad de México, México. P. Molleda Martínez (2011).

A su vez, todas estas ventajas competitivas que demostró el sistema de humedales artificiales en la anterior tabla, permiten entender de mejor manera su perfil sustentable ya que su impacto ambiental es mínimo, la versión económica que requiere es menor a otros métodos y no

solo cumple con el tratamiento del agua, si no que puede incluso proporcionar beneficios estéticos a los usuarios.

Es por todas estas ventajas que durante los años setenta y ochenta se inició la implementación de humedales Artificiales, utilizándolos principalmente como estaciones de depuración de aguas residuales urbanas. Sin embargo, a partir de la década de los noventa, también se emplearon con éxito en el tratamiento de distintas aguas residuales industriales (Yocum, 2011).

Por último, para entender los rendimientos que podría generar el prototipo diseñado en esta investigación, se utilizaron como fundamento los obtenidos en un estudio realizado en Alemania al final de la década de los ochenta, donde se realizó un programa de medición y armonización de las depuradoras de filtro vegetal existentes (Izembart y Le Boudec, 2003).

Este programa consistió en estudios hidráulicos y microbianos, así como múltiples mediciones continuas acerca del oxígeno, el gas carbónico y las materias orgánicas en períodos de diez a catorce días. De esta manera, se determinó que las variaciones presentes en los resultados de las distintas depuradoras dependen de la combinación de cinco parámetros: (Izembart y Le Boudec, 2003).

- La existencia o no de un pre tratamiento para el agua antes de entrar al sistema.
- La composición del agua residual y su reparto dentro del sistema
- La naturaleza del sustrato empleado
- La dirección del flujo de agua
- El tipo de plantaciones que contiene el sistema

Este dictamen marco una guía para desarrollar depuradoras con filtros vegetales, indicando que se debían cumplir las siguientes características: (Tanner, Sukias y Yates , 2010)

1. Se requiere una superficie de 5 m<sup>2</sup> por habitante (10 m<sup>2</sup> en el caso de las lagunas)
2. La superficie mínima de una depuradora debe ser de al menos 25 m<sup>2</sup>
3. La profundidad mínima es de 30 cm para los sistemas de desagües horizontales y 60 cm para los verticales
4. Se debe realizar un reparto uniforme de las aguas en los lechos vegetales
5. En los sistemas de humedales artificiales con flujo superficial, se aconseja una distancia mínima de 25 m con respecto a las construcciones habitacionales

Si bien algunas de estas especificaciones se siguen respetando al día de hoy, algunas ya han sido superadas gracias a la utilización de nuevas tecnologías y/o materiales en el diseño e implementación de los sistemas de humedales artificiales. Por ejemplo, las medidas de estos actualmente solo dependen de la cantidad y tipo de agua a tratar, así como de la climatología del lugar y las características del proyecto.

A continuación se puede apreciar un resumen de las capacidades de remoción de contaminantes por parte de los humedales artificiales que han sido apreciadas en investigaciones anteriores.

<b>Tabla 4.- Capacidad de remoción de contaminantes de los humedales artificiales de flujo sub-superficial</b>		
<b>Contaminante</b>	<b>Capacidad de remoción</b>	<b>Observaciones</b>
DBO <sup>5</sup>	Se puede obtener por debajo de 20 mg/L; aunque no es posible bajar de una DBO <sub>5</sub> de 7-10 mg/l, ya que este rango parece proceder de residuos orgánicos del propio sistema	Se requiere un tiempo de retención hidráulico de aproximadamente 2 días para el tratamiento. No se ha establecido relación entre la longitud anchura (L:A), del humedal y su capacidad de remoción de DBO <sup>5</sup>
Sólidos Totales Suspendidos	Consiguen valores de salida inferiores a 20 mg/l	El rendimiento máximo del sistema se puede alcanzar en 1 día ya que es independiente del tiempo de retención y de la relación (L:A) del humedal.
Nitrógeno	La des nitrificación puede limitarse por la falta de una fuente de carbono para el proceso; por cada gramo de nitrógeno son necesarios aprox. 3 gramos de DBO <sub>5</sub> para su tratamiento	En algunos casos se han obtenido importantes reducciones, asociadas a un aporte de oxígeno por las raíces de las plantas, en sistemas de poca profundidad (0.3 m)
Fósforo	La cantidad de fósforo en el efluente es prácticamente igual que en el influente, en la mayoría de los casos.	La capacidad de tratamiento se puede mejorar si se usan grandes áreas con grava rica en hierro y aluminio o tratamientos alternativos de eliminación de fósforo
Patógenos	Los humedales pueden reducir los coliformes fecales en uno o dos órdenes logarítmicos y en algunos casos se han obtenido 200 UFC/100 mL o menores	Los picos de caudal influyen negativamente en la eficiencia de remoción de coliformes fecales. Serían necesarios tiempos de retención de superiores a 14 días para lograr reducciones de 3 o 4 logaritmos

Metales pesados	La adsorción de iones metálicos es un proceso químico que se ve favorecido por un sustrato arcilloso u orgánico, así como por la capa de detritus presente en los humedales.	No se han establecido claramente cuales metales presentan mayor tendencia al proceso de adsorción en humedales artificiales. Factores como el pH del agua, el tiempo de contacto o la formación de óxidos e hidróxidos metálicos en el sistema condicionan la adsorción
-----------------	--	---

**Fuentes:** Lahora, 2003; Lara Borrego, 1999; U.S. Environmental Protection Agency (2000a). Manual: Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters. EPA/625/R-99/010. US EPA Office of Research and Development. Cincinnati; Gómez, R.; Suárez, M. L. y Vidal-Abarca, M. R. (2001). The performance of a multi-stage system of constructed wetlands for urban wastewater treatment in a semiarid region of SE Spain. Ecological Engineering, 16: 501-517.

La anterior tabla, con excepción de los rubros referidos a los patógenos y metales pesados, se tomó como base para determinar los resultados esperados del prototipo de esta investigación. Esto debido a que con el prototipo desarrollado en esta investigación se busca tratar agua gris para lograr su reúso en el riego de áreas verdes o en mingitorios y en ambos casos, los rubros mencionados no tienen mayor impacto.

Por ejemplo, dado que se busca realizar la instalación del prototipo en las azoteas de los edificios y tomando en cuenta cómo se puede lograr una mejor des nitrificación así como la reducción de larga final del sistema que se desea lograr, se determinó que la altura a emplear en el mismo, será de 30 cm.

## CAPÍTULO II

### La importancia del agua en la viabilidad de las ciudades

El problema de la cantidad y calidad del agua en los distintos países desarrollados o en vías de desarrollo, es una problemática a la que cada vez se le está prestando mayor atención debido a que afecta directamente la calidad de vida de las personas (Anaya Garduño, Escasez de agua en América Latina y el Medio Oriente. Estudio de casos, problemas y soluciones, 2011). “El abasto de agua para la población en general, es una necesidad fundamental, un derecho humano y también un indicador determinante de la salud y el bienestar público” (Martos Nuñez y Martos García, 2015).

Desde los primeros asentamientos humanos, el agua y las ciudades han sido dos temas muy interrelacionados. En el año 2010, los autores Loffrano y Brown afirmaron “Si bien en la actualidad los avances tecnológicos han permitido mayor acceso al vital líquido aun a las partes más remotas, no hay manera de sustituir al agua: una ciudad sin agua es simplemente inviable” (pág. 5256).

Por otra parte, el concepto de ciudad ha ido evolucionando a través del tiempo de manera progresiva de acuerdo a las necesidades y situaciones sociales y/o económicas de los usuarios que las habitaban, mostrando con ello características y diferencias en los distintos períodos que vale la pena establecer y estudiar a fondo, pues permiten entender de mejor manera el porqué de la situación actual de las mismas.

Durante el período Neolítico, la creación de ciudades estaba condicionada a realizarse en lugares ubicados cerca de cuerpos de agua para facilitar y garantizar el acceso al vital líquido. Un lugar que no cumplía con condición se convertía en inviable para este objetivo pero con el paso del tiempo se buscó generar e implementar diversos avances tecnológicos para garantizar el acceso de agua a toda la población (Herce Vallejo, 2013). Todo esto tuvo su mayor apogeo en las ciudades como Roma, donde se crearon impresionantes construcciones de acueductos y canales con este fin (Lofrano y Brown, 2010).

Para la época medieval, las ciudades se construían alrededor de castillos y se encontraban fortificadas y rodeadas por una gran pared y torres que servían para vigilar. Esto se debía principalmente por dos causas: El sistema económico de feudalismo que reinaba en la época (y las murallas facilitaban controlar el acceso y cobro de impuestos) y lo comunes que eran las invasiones y guerras con otros pueblos (López de Lucio, 2013)

En esta época las casas estaban construidas unas al lado otras y solo se encontraban separadas por pequeñas calles que en raras ocasiones se encontraban empedradas, sin embargo, este hacinamiento de casa era en pro de la generación de espacios públicos ya que poseían grandes plazas donde se llevaban a cabo los principales acontecimientos de la ciudad.

Además, debido a las creencias religiosas que reinaban en este tiempo, se llegó a considerar el contacto con el agua (y los baños en general) como algo malo, lo que causo que en estas urbes solo se implementaran infraestructuras mínimas e insuficientes para lograr obtener agua potable y desechar las aguas residuales (Lofrano y Brown, 2010).

Por todo esto, estas ciudades no eran demasiado grandes dado que la población disminuyó a causa del aumento de enfermedades que se generó por la insalubridad que reinaba en las mismas. Por tanto, estos lugares ejemplificaron el importante rol que juega el agua para garantizar la supervivencia de una ciudad y sus habitantes, así como las consecuencias de no contar con la misma (López de Lucio, 2013).

Al paso del tiempo, la importancia del agua fue revalorizada y las ciudades fueron dando nuevamente cada vez más importancia a la generación de infraestructuras que sirvieran para garantizar el acceso a la misma. Sin embargo, fue a partir de la revolución industrial que se volvieron a producir importantes cambios en este tema.

Con el avance de la tecnología, la introducción de la máquina de vapor y la producción en masa, fue posible la creación de ciudades en lugares que antes se consideraban imposibles, tal como el caso de las Vegas (Soto Montes de Oca, 2007).

Sin embargo, el tiempo ha demostrado que la dependencia de las ciudades hacia las tecnologías para garantizar el abastecimiento de sus recursos básicos (agua, alimentos, etc.) las ha convertido en insostenibles a largo plazo y ello se evidencia a través de sus crecientes problemáticas ambientales, físicas y sociales fruto de este tema (Soto Montes de Oca, 2007).

## 2.1.- El ciclo del agua en las zonas metropolitanas

Para abordar este tema, primero se definió el término de Zona Metropolitana. Al día de hoy, hablar de la Ciudad de México es referirse a una amplia zona urbana que ya ha superado sus límites administrativos y territoriales oficiales, absorbiendo e integrando en sí misma a otros

territorios vecinos; por ello no se le puede considerar como a una simple ciudad<sup>43</sup> si no que se debe buscar una definición que se adapte mejor a este lugar.

Un término que se aplica para denominar a la misma es *Metrópolis*, el cual se refiere a la ciudad más importante de un país o región (Ramírez B., 2006), y si bien esto podría corresponder con el caso, el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) más bien denomina a este territorio como una *Zona Metropolitana del Valle de México* (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2012).

El INEGI define como *Zona Metropolitana* a un conjunto de dos o más distritos donde se localiza una ciudad de 50 mil o más habitantes, cuya área urbana rebasa el límite del municipio que originalmente la contenía, incorporando como parte de sí misma a otros municipios, con los que mantiene un alto grado de integración socioeconómica (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2012). Por esto, se consideró que este término expresa de manera más precisa la situación de la Ciudad de México y sus áreas conurbadas y por ello será el que se empleará durante este trabajo para referirse a este territorio.

Ahora bien, analizando el tema a fondo, se concluyó que el agua impacta en el funcionamiento de las ciudades de dos maneras: en su empleo y durante su ciclo de renovación. El primero, se refiere a la necesidad básica de los edificios de emplear agua para garantizar su funcionamiento interno y el confort de los usuarios, así como a la cultura de utilizarla una vez y desecharla. Por tanto, también se refiere a toda la infraestructura que se necesita crear y/o cuidar para garantizar el traerla y luego de usada, tratarla, reutilizarla y/o integrarla de nuevo al medio ambiente.

El segundo, se refiere a cómo el crecimiento desaforado y sin coherencia en la aplicación de las normativas urbanísticas que han presentado las ciudades,<sup>44</sup> generó a su vez el aumento de cuatro factores que impactan y/o frenan el ciclo hidrológico que se daba naturalmente en los terrenos que estas abarcan: (Ramírez B., 2006)

- El incremento de las áreas impermeables debido al uso de concreto como cubierta de suelo (Cabrera-Marcet, 2015)

---

<sup>43</sup> Entendiéndose “ciudad” como el término empleado para referirse a las zonas urbanas funcionales y que abarcan a uno o más municipios pequeños. OECD (Desconocido). *Gobernanza del agua para las ciudades del futuro*. Publicado en la página web [oecd.org](http://www.oecd.org). Disponible en: <http://www.oecd.org/gov/regional-policy/gobernanza-agua-ciudades-nota.pdf>

<sup>44</sup> Este fenómeno ocurre con mayor frecuencia en los países en vía de desarrollo..

- La obstaculización o desvío de los cauces naturales
- Los residuos sólidos y el drenaje vertido a los escurrimientos, por parte de los asentamientos irregulares.
- La notoria superación de la capacidad de la infraestructura de agua potable existente, degenerando en la carencia del líquido para muchas personas (Rodríguez Bayon, 2009)

El resultado más notorio generado a partir de estos factores es una fuerte aislación del terreno que se encuentra debajo de los entornos urbanos de alta densidad, lo que hace que el porcentaje de escorrentía superficial<sup>45</sup> que se genera tras el paso de un fenómeno pluvial pueda llegar hasta el 95%, mientras que en un ambiente natural es apenas de un 5% (Rodríguez Bayon, 2009)<sup>46</sup> Esta acción de aislamiento del suelo también evita que los acuíferos naturales situados bajo las ciudades puedan recargarse.

Después esta escorrentía es la que se reúne rápidamente en las zonas más bajas de las áreas urbanas, satura las infraestructuras existentes y causa inundaciones, al tiempo que causa que el agua pluvial termine llevando consigo una carga muy importante de contaminantes.

Sin embargo, es importante aclarar que los dos ciclos de agua que se acaban de explicar en realidad se encuentran muy interrelacionados. La problemática general del agua es un tema muy complejo, en donde cada uno de los problemas en los que se traduce (escasez, inundaciones, etc.) están concatenados<sup>47</sup> e influyen con su presencia (en mayor o menor medida) a la generación de otros.

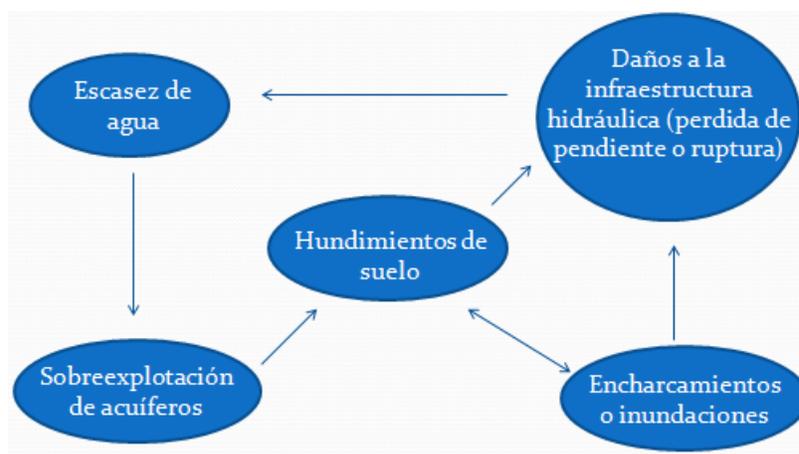
De esta forma aunque pudiera parecer que el hecho de que en la Zona Metropolitana del Valle de México se encuentran en aumento la escasez hídrica y las inundaciones son dos temas sin ninguna relación, en verdad sí lo están. Lo anterior se puede entender mejor a través de la siguiente figura.

---

<sup>45</sup> Agua de lluvia que circula libremente sobre la superficie de un terreno. Universidad de Puerto Rico, recinto universitario de Mayagüez (Uknow). *¿Qué son las aguas de escorrentía?* Publicado en la página Web: uprm.edu Disponible en: <http://www.uprm.edu/manejodeaguas/>

<sup>46</sup> La información expuesta es una versión interpretada y resumida de la información expuesta por el autor.

<sup>47</sup> El término se refiere a un enlace de hecho o ideas que guardan entre sí una relación lógica o de causa y efecto. Por ejemplo, una concatenación de circunstancias. Extraído del diccionario de Oxford, disponible en: <http://www.oxforddictionaries.com/es/d>



**Figura 7.- Interrelación de las problemáticas del agua.** Esquema de realización propia.

Además de lo anterior, también se debe aclarar que de los dos ciclos que cumple el agua dentro de las ciudades, el que se estudió a fondo para realizar este trabajo es el del empleo del agua y la subsecuente problemática que representa, pero esto únicamente se hizo a modo de acotar la investigación y no perder de vista el objetivo final de la misma.

## 2.2.- Principales problemáticas con respecto a la utilización del agua en las zonas metropolitanas.

Para entender el origen e impacto de los principales problemas del agua, es necesario evidenciar que estos tienen la misma base. Para esto primero se estudian los hechos de manera general y luego se detallan los existentes para el caso particular de la Zona Metropolitana del Valle de México.

Las problemáticas del agua se deben principalmente a cuatro factores; el primero es la cantidad de agua dulce o apta para el consumo humano que existe en nuestro mundo, porque si bien el 70.8% de nuestro planeta está cubierto por esta, únicamente el 3% de la misma, es de este tipo. Este porcentaje sería equivalente a 35 millones de km<sup>3</sup> (Comisión Nacional del Agua, 2014). Sin embargo, la mayoría de esta agua se encuentra inaccesible para el uso humano ya que se encuentra en los polos y nieves eternas. La distribución del agua dulce a nivel mundial, se puede apreciar de mejor manera en la siguiente tabla.

Tabla 5.- Distribución de la reserva de agua dulce en el mundo			
Tipo de reserva	% de la reserva en agua dulce	Detalle	% de la reserva en agua dulce
Hielo y nieve	69.6	Antártico	61.70
		Groenlandia	6.68
		Ártico	0.24
		Otros (Montañas, "permafrost")	0.98
Aguas subterráneas	30.15	Acuíferos	30.10
		Agua contenida en el suelo	0.05
Lagos y pantanos	0.29		
Agua contenida en atmósfera	0.04		
Ríos	0.006		

Fuente: Shiklomanov, 1999, pág. 127.

Debido a factores físicos, en nuestro país además existe una distribución desigual de los recursos hídricos. El 80% del agua dulce nacional se encuentra a menos de 500 m. de altura sobre el nivel del mar, mientras que solo el 5% está arriba de los 2000 metros, y sin embargo, es en las planicies altas donde se encuentra cerca de un tercio de la población nacional y dos tercios de la producción industrial manufacturera del país (Jiménez Velázquez y Asteinza Bilbao, 2008).

El segundo factor es el hecho de que en los últimos sesenta años la población mundial se ha triplicado, dando pie a que la cantidad de agua extraída globalmente desde lagos, ríos y mantos acuíferos, se haya multiplicado cerca de nueve veces, mientras que el consumo por persona se haya duplicado (Carbajal, 2013). Cabe mencionar que la cantidad de consumo de agua varía de acuerdo al nivel socioeconómico de las personas<sup>48</sup> y del país del que estudiado ya que los desarrollados, tienen un consumo general del líquido, mayor a los que se encuentran en vía de desarrollo (Anaya Garduño, Captación del agua de lluvia. Solución caída del cielo, 2011).

Esto nos lleva a su vez al tercer factor que es la cultura que prevalece actualmente sobre utilizar el agua una vez y luego considerarla desperdicio (Martos Nuñez y Martos García, 2015). Finalmente el cuarto factor es que la población en general, sobre todo la de los países en desarrollo, presenta una fuerte tendencia a migrar a centros urbanos de gran tamaño. Por ejemplo, en México el Consejo Nacional de Población (CONAPO) espera que para el año 2030 exista una demografía en el país de 137, 481,336 millones de personas y que el 53% de estos se encuentren asentadas en

<sup>48</sup> A mejor calidad de vida, mayor cantidad de consumo de agua por persona.

35 centros de población urbana con más de 500, 000 habitantes (Consejo Nacional de Población, 2014).<sup>49</sup>

Por esto, actualmente la mitad de la humanidad vive en ciudades y dentro de dos décadas, se espera que casi el 60% de la población mundial habite en núcleos urbanos (Departamento de Asuntos Economicos y Sociales de Naciones Unidas (ONU-DAES), 2014). Lo que ha llevado a su vez, al crecimiento del tamaño de las ciudades y a un subsecuente incremento de las problemáticas relacionadas con el manejo del agua, siendo las principales el aumento de la demanda de agua, la escasez hídrica, las inundaciones y el retiro y tratamiento de las aguas residuales.

A su vez, el conjunto de todos estos, pueden conducir al surgimiento de enfermedades como la diarrea o el cólera. Por ello, ninguna ciudad que sufra de problemas con el agua, puede considerarse sustentable (Padrón Cruz y Cantú Martínez, 2009).

Sin embargo, los esfuerzos para mejorar este panorama en las grandes ciudades de nuestro país, han resultado insuficientes. Una de las causas es que en la actualidad, la mayoría de la población considera que buscar e implementar soluciones para este, es únicamente responsabilidad del gobierno (Hernandez Moreno , 2008). No obstante, es cada vez más evidente que para mejorar los problemas relacionados con el manejo del agua, se requiere la participación de todos los involucrados (individuos y sociedades).

Por ello, para generar nuevas tecnologías que mejoren la situación existente, se requiere entender a fondo los orígenes e impactos de esta, así como cuidar sean utilizables para toda la población en general. En este caso, dado que esta investigación se centró en disminuir el impacto de la falta de agua al interior de los edificios, fue este punto el que se investigó a fondo.

La escasez hídrica es un tema que ha sido cuestión de interés en la agenda internacional; esto se evidenció en diversas reuniones realizadas para adoptar importantes resoluciones sobre el tema del agua, entre las que destacó el IV Foro Mundial del Agua, celebrado en la Ciudad de México en el año 2006, del 16 al 22 de marzo (Jiménez Velázquez y Asteinza Bilbao, 2008).

Para determinar si un país o territorio sufre de escasez hídrica, se utiliza como base la disponibilidad de agua dulce por habitante. La Organización Mundial de la Salud estima que para satisfacer las necesidades diarias básicas de un estándar de vida mínimamente aceptable, se

---

<sup>49</sup> Esta estadística demuestra que la situación actual solo se incrementará a futuro, tanto en el crecimiento de la población, como en lo de los problemas del agua.

requieren de 50 a 100 litros de agua dulce por persona (Anaya Garduño, Objetivos y logros del Centro Internacional de Desmostración y Capacitación en Aprovechamiento del Agua de Lluvia (CIDECALLI), 2008). Por tanto, se determina que sufren de escasez hídrica, aquellas áreas que no puedan proveer de esta cantidad a sus habitantes.

Teniendo en cuenta lo anterior, se ha registrado el incremento de este problema a lo largo del tiempo. En 1950, no más de diez países sufrían escasez de agua pero a partir de 1995, treinta y un países enfrentaron esta situación. De mantenerse la tendencia actual, para el año 2050, sesenta y seis países se enfrentarán a esta preocupación, comprendiendo así a dos terceras partes de la población mundial (Anaya Garduño, Captación del agua de lluvia. Solución caída del cielo, 2011).

En el caso de México, desde el año 2009 se cruzó el umbral de disponibilidad media baja de agua dulce, ya que se disponían de menos de 5 mil metros cúbicos anuales por habitante (Carbajal, 2013). Esta tendencia se ha mantenido y la disponibilidad media per cápita a nivel nacional ha disminuido de 4416 m<sup>3</sup>/habitante/año a 3841 m<sup>3</sup>/habitante/año.

En el 2016, los investigadores Mesfin M. y Arjen Y. afirmaron que en nuestro país existen 90 millones de mexicanos que sufren de la falta de agua y de estas a su vez, 20 millones sufren escasez severa por lo menos 4 o 6 meses al año (pág. 1-3). A futuro se prevé que en algunas partes del país sufran condiciones de escasez grave, disponiendo de 1000 m<sup>3</sup> por persona al año o menos. Las regiones hidrológicas en mayor peligro de sufrir esto son: La península de Baja California, Rio Bravo y el Valle de México (Aguilar Reyes, 2009).

A su vez, existen áreas dentro de la Zona Metropolitana del Valle de México que han tenido mayor recurrencia con el problema de la falta de agua, tal y como es el caso de las delegaciones de Magdalena Contreras, Iztapalapa y Coyoacán.<sup>50</sup> Ahora bien, como parte de este trabajo, se concluyó que los factores involucrados en la generación de la escasez hídrica son:

- Sobreexplotación y daño a los mantos acuíferos
- La falta y/o superación de la capacidad de la infraestructura para el abastecimiento de agua potable
- La falta o insuficiencia de infraestructuras para el tratamiento y reúso del agua residual

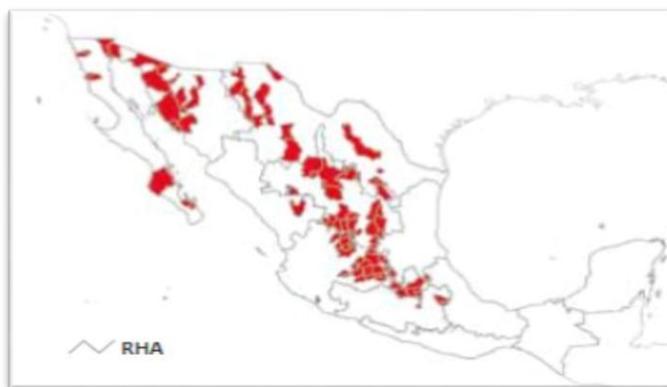
---

<sup>50</sup> Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). (2011). *Modelo de Marco Institucional para la Gestión de Recursos Hídricos en el Valle de México*. Informe de resultados de investigación. Consultado el 17 de enero del 2014.

En primer lugar, con el crecimiento de las ciudades también aumentaron sus necesidades hídricas, lo que ha llevado a una mayor explotación de los cuerpos de agua, y del caudal generado a nivel nacional, 37% se obtiene de fuentes subterráneas. Los principales motivos para emplear estas aguas es que son accesibles, de buena calidad y abundantes (Martínez y Ruano, 1998).

Sin embargo, el ritmo actual ha significado la utilización desproporcionada de los mantos acuíferos, generando consecuencias tales como la sobreexplotación y la contaminación de estos. Para Diciembre del 2013, CONAGUA tenía identificados 653 acuíferos, de los cuales 106 estaban sobreexplotados, extrayéndose de ellos el 55.2% del agua subterránea para todos los usos (Comisión Nacional del Agua, 2014).

Para el año 2008, se requería un caudal promedio de 32 m<sup>3</sup>/s solo para cubrir las necesidades hídricas de la Zona Metropolitana del Valle de México. En este mismo año, Transparencia Medio Ambiente, DF, afirmó que el origen del agua era el siguiente:



**Figura 8.- Acuíferos contaminados en el país para el año 2009.**  
Fuente: CONAGUA, 2011.

El 67 por ciento del caudal suministrado se obtiene de fuentes subterráneas: 55 por ciento del acuífero del valle de México y 12 por ciento del valle del Lerma, el cual se ubica en el Estado de México a 70 Km de la gran ciudad. En tanto que el caudal restante se obtiene de fuentes superficiales, 3 por ciento de manantiales ubicados en la zona sur poniente de la ciudad y 30 por ciento del sistema Cutzamala, el cual se encuentra en los estados de México y Michoacán, a una distancia de 124 Km de la ciudad.

Tabla 6.- Fuentes de abastecimiento de agua potable del distrito federal.		
Fuentes de Abastecimiento	Municipios de los que se traen los caudales	Caudal promedio de abastecimiento en 2008 (m3/s)
<b>Fuentes externas al Distrito Federal</b> <i>Fuentes Operadas por la Gerencia de Aguas del Valle de México</i>		
Sistema Cutzamala	Ixtapan del Oro, Valle de Bravo, Donato Guerra, Villa de Allende, Villa Victoria, Almoloya de Juárez, Toluca, Estado de México.	9.575
Barrientos y Risco	Tultitlan, Cuautitlán, Tlalnepantla, Edo. de México	2.239
Sistema de Aguas del Sur	Milpa Alta, Tláhuac, Valle de Chalco y La Paz, Estado de México	0.382

<b>SUBTOTAL</b>		<b>12.196</b>
<i>Fuentes Operadas por el Sistema de Aguas de la Ciudad de México</i>		
Sistema Lerma	Lerma, Ocoyoacac, Oztolotepec, San Lorenzo Oyamel, Temoaya, Xonacatlan, Almoloya del Río, Calpuhuac, Jiquipilco, Joquicingo, San Pedro Techuchulco, Santa Cruz Atizapán y Santiago Tianguistenco, Edo. de México.	3.832
Sistema Chiconautla	Ecatepec, Tecamac, Acolman, Estado de México	3.832
<b>SUBTOTAL</b>		<b>5.234</b>
<b>Fuentes ubicadas dentro del Distrito Federal</b>		
<i>Fuentes Operadas por el Sistema de Aguas de la Ciudad de México</i>		
Pozos Red Norte	Azcapotzalco, Gustavo A. Madero, Distrito Federal.	1.037
Pozos Red Centro	Benito Juárez, Cuauhtémoc, Coyoacan, D. F.	2.037
Pozos a la Red Sur	Milpa Alta, Tláhuac, Xochimilco, Distrito Federal	7.853
Pozos Red Oriente	Iztacalco, Iztapalapa, Venustiano Carranza, D. F.	2.773
Pozos a la Red Poniente	Álvaro Obregón, Cuajimalpa, Magdalena Contreras, Miguel Hidalgo, Tlalpan, Distrito Federal	0.213
Río Magdalena	Magdalena Contreras, Distrito Federal	0.203
Manantiales	Álvaro Obregón, Cuajimalpa, Magdalena Contreras, Tlalpan, Distrito Federal.	0.792
<b>SUBTOTAL</b>		<b>14.908</b>
<b>TOTAL AL D. F.</b>		<b>32.338</b>

Fuente: Transparencia medio ambiente, 2010.

En el caso del segundo factor, se debe considerar que el promedio de vida útil para un sistema de distribución de agua potable (tuberías, etc.) es de 20 años (PUMAGUA, 2010); Sin embargo, el reemplazo de cada instalación que cumpla su período útil es, a largo plazo, algo difícil de realizar debido, principalmente, a los costos económicos que ello representaría (Barkin, 2010).

Es por esto que al paso del tiempo, el deterioro del sistema termina por generar fugas en las tuberías y subsecuentes pérdidas de agua que son cada vez mayores. En el caso de la zona metropolitana del Valle de México, las filtraciones causan la pérdida del 37% del agua que se distribuye a la ciudad (Delgado Peralta, 2007).

Por último, la falta o insuficiencia de infraestructura para el tratamiento y/o reutilización del agua residual, además de sufrir una problemática económica similar a la del punto anterior, es un problema propiciado por factores físicos que se explicaran a profundidad en el tercer capítulo.

Sin embargo, las consecuencias de este problema, son cada vez más notorias y graves. Esto se debe a que, al no existir o ser insuficiente la infraestructura para el tratamiento de las aguas residuales, se generan descargas de aguas residuales sin depuración o tratamiento en los cuerpos de agua superficiales y la consecuente infiltración de agroquímicos a los acuíferos (Anaya

Garduño, Escasez de agua en América Latina y el Medio Oriente. Estudio de casos, problemas y soluciones, 2011).

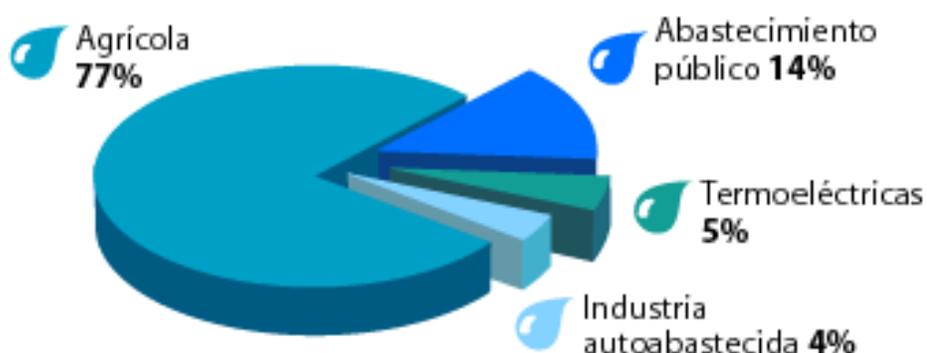
Todo lo anterior a su vez, contribuye a que se vuelva más difícil lograr abastecer la cantidad de agua necesaria para satisfacer las necesidades hídricas de la población, pues se vuelve cada vez más necesario realizar tratamientos en las fuentes de agua a fin de obtener agua potable. Este panorama en general, contribuye también a la generación de la escasez hídrica.

La contaminación de aguas ha trascendido incluso hasta conflictos de tipo internacional, un ejemplo de ello son las descargas de aguas residuales procedentes de poblaciones mexicanas que han afectado ya la calidad de las playas cercanas a la frontera en los Estados Unidos (Athie Lambarri, 1987).

Con base en todo lo anterior se puede concluir que la implementación a gran escala de un prototipo que trate y/o reutilice el agua gris generaría la disminución de las cantidades de aguas residuales, así como de las cantidades hídricas necesarias para el funcionamiento de los edificios.

### 2.3.- Reutilizar agua gris, una forma de disminuir la escasez hídrica en las ciudades

Los recursos hídricos de nuestro país se destinan a diversos fines, según la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), para el año 2009 la distribución de volúmenes concesionados para usos agrupados consecutivos, fue la siguiente:



**Figura 9.- Porcentajes del destino y uso del agua potable en México.** Gráfico adquirido con fines educativos.  
Fuente: Estadísticas del agua en México, edición 2011.SEMARNAT.

En el año 2014, CONAGUA afirmó que el agua destinada al abastecimiento de las necesidades públicas equivale más o menos a 12 mil millones de m<sup>3</sup> (Comisión Nacional del Agua, 2014); este caudal una vez utilizado en algún proceso humano, se convierte en agua residual. La

Ley Nacional de Aguas definió en el año 2002 a este término como “las aguas de composición variada provenientes de las descargas de usos municipales, industriales, comerciales, agrícolas, pecuarios, domésticos y en general de cualquier otro uso” (pág. 1)

A su vez, de acuerdo a la actividad en la que fueron empleadas, así como los contaminantes contenidos, las aguas residuales se dividen en dos tipos: (Aguilar Reyes, 2009).<sup>51</sup>

- 1) **Aguas municipales:** Son aquellas que se generan en los edificios de orden público, no importando su funcionamiento. Un ejemplo de esto son las casas habitación, las escuelas, etc. Al ser una clasificación tan amplia, no existen muchas normas que los regulen, causando que los diversos sistemas de tratamientos de aguas usados de manera pública por el estado, tales como los lodos activados, tengan un período de vida menor o inestable.
- 2) **Aguas industriales:** Estas son aquellas que formaron parte de algún proceso industrial. Son aguas con contaminantes más específicos y, muchas veces, con mayor concentración. Es por esto que las regulaciones suelen exigir que esta clase de aguas sean tratadas por un sistema individual por la misma industria antes de integrarlas al drenaje.

A su vez, las aguas municipales pueden dividirse en cuatro subtipos:

- a) **Aguas negras:** Son aquellas que incluyen desechos sólidos. Suelen provenir de los WC.
- b) **Aguas jabonosas:** Son aquellas que incluyen jabón dentro de sus contaminantes. Proviene de duchas, lavadoras, lavabos, etc.
- c) **Aguas grises:** Son las que no incluyen restos sólidos ni necesariamente jabonosas, provienen de orinales, etc.
- d) **Casos especiales:** Se considera así al agua obtenida de edificios donde se generan grandes cantidades de grasas o productos químicos en los procesos realizados al interior, tales como talleres mecánicos o restaurantes. En estos casos se recomienda colocar una trampa de grasas como parte de la instalación sanitaria, para así evitar que todos estos productos lleguen al drenaje y dañen los sistemas de tratamiento de aguas públicos.

Como en esta investigación se busca tratar aguas grises, es importante ahondar en la definición de estas. Según la investigadora Dayna Yacum (2011), estas se podrían definir como:

Las agua que salen de fregaderos, de los baños o de fregaderos [...] típicamente las aguas grises contienen nitratos, fosfatos, jabones, sal, bacterias, espumas, partículas de alimento, materia orgánica, sólidos suspendidos, perfumes y colorantes. Las adiciones de las aguas grises a los cuerpos de agua en la superficie pueden causar desequilibrios de pH, la demanda aumentada de oxígeno (DBO) e incremento en turbidez. (pág. 1)

---

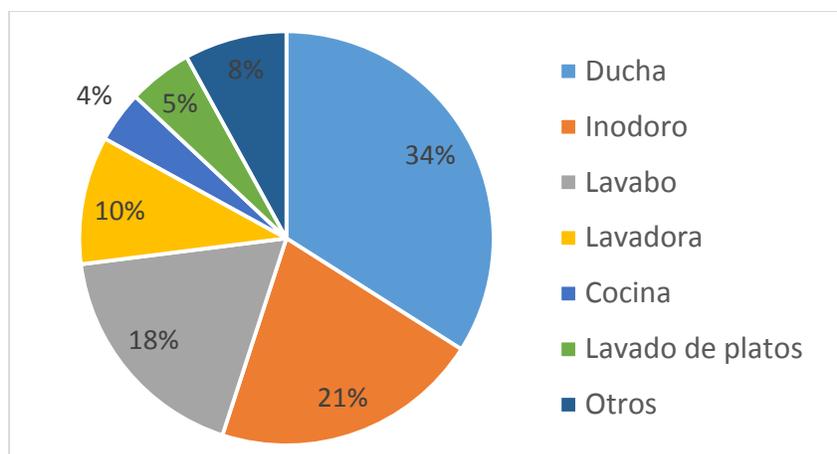
<sup>51</sup> La información mostrada es un resumen de lo expresado por la autora en su artículo.

Con base a lo mostrado en la anterior definición, se investigaron las consecuencias de los contaminantes que más comúnmente integran a las aguas grises, obteniendo la siguiente tabla.

Tabla 7.- Contaminantes importantes de interés en el tratamiento de las aguas residuales	
Contaminantes	Consecuencias
Sólidos suspendidos	.Pueden generar el desarrollo de depósitos de lodo y condiciones anaerobias cuando los residuos no tratados son lanzados al ambiente acuático
Materia orgánica biodegradable	Se encuentra compuesta principalmente por proteínas, carbohidratos y grasas. Por lo general se mide en términos de DBO y DQO. Si se descarga sin tratamiento al medio ambiente, su estabilización biológica puede llevar al consumo de las fuentes de oxígeno natural y al desarrollo de condiciones sépticas.
Microorganismos patógenos	Los mismos patógenos existentes en las aguas residuales pueden transmitir enfermedades.
Nutrientes	Cuando son lanzados al ambiente acuático, pueden llevar al crecimiento de vida acuática indeseable. Cuando son aplicados al suelo en cantidades excesivas pueden también contaminar el agua subterránea. Uno de estos es el Fósforo.
Compuestos tóxicos	Compuestos orgánicos e inorgánicos seleccionados en función de su conocimiento o sospecha de carcinogenicidad, mutanogenicidad, teratogenicidad o elevada toxicidad. Muchos de estos compuestos se pueden encontrar en las aguas residuales.
Materia orgánica refractaria	Esta materia orgánica tiende a resistir los métodos convencionales de tratamiento de aguas residuales. Ejemplos típicos incluyen detergentes, fenoles y pesticidas agrícolas.
Metales pesados	Los metales pesados son normalmente adicionados mediante actividades humanas. Tienen una alta persistencia en el ambiente, lo que incrementa su posibilidad de acumulación y toxicidad.
Sólidos inorgánicos disueltos	Componentes inorgánicos como calcio, sodio y sulfato. Deben ser removidos si se va a reutilizar el agua ya que son potenciales degradadores del suelo.

Fuente: Metcalf & Eddy, Burton L., Tchobanogluos y Stensel, 2003

Ahora bien, tras apreciar los diversos tipos de aguas municipales, se puede asumir que una de las edificaciones donde se genera más comúnmente la convivencia de todos estos, es la casa habitación. Por ello, se investigaron los porcentajes de utilización del agua dentro de las actividades domésticas de estas.



**Figura 10.- Porcentaje de utilización del agua dentro de las actividades domésticas de una edificación plurifamiliar intensiva.** Domene E., Saurí D., Martí X., Molina J. y SAGRARIO H. (2009) *Tipologías de vivienda y consumo de agua en la Región Metropolitana de Barcelona*. Universidad Autónoma de Barcelona, España.

Con base en la información mostrada en el anterior gráfico, se puede concluir que el porcentaje de agua domestica tratable por un prototipo de humedal artificial, depende de diversos factores explicados a detalle a continuación.

Tabla 8.- Porcentajes de aguas residuales tratables por humedales artificiales			
Porcentaje de agua tratable	Sistema de separación de contaminantes	fuentes del agua a tratar	Observaciones
36%	Ninguno	Lavabo, lavadora y otros	Sin generar una separación de contaminantes, es recomendable tratar únicamente a este porcentaje de agua. De sumarse la generada en otros procesos, se corre el riesgo de tapan el sistema de los humedales con grasas y/o aceites
79%	Trampa de grasa	Lavabo, lavadora, otros, cocina, lavado de platos y ducha	Con la instalación de una trampa de grasa como parte de la instalación del sistema, se evitarían riegos de taponeo.
100%	Trampa de grasa y fosa séptica	Lavabo, lavadora, otros, cocina, lavado de platos, ducha e inodoro	Con el uso de fosa séptica y una trampa de grasa, se garantiza la separación de los desechos sólidos y aceites que pueden dañar al sistema.

Tabla de elaboración propia

Como conclusión, la integración de sistemas de separación de sólidos, grasas y aceites, aumenta el potencial para tratar mayor cantidad de agua generada al interior de las edificaciones. Por esto, se debe analizar cada caso para determinar qué tipo de instalación es la más conveniente, considerando el costo-beneficio con respecto a la inversión económica necesaria.

## 2.4.- Calidad del agua y parámetros a cumplir para su reutilización

La calidad del agua no es una característica absoluta, sino más bien un atributo definido socialmente (Soto Montes de Oca, 2007). Los factores a tomar en cuenta para la determinación de la calidad del agua son pH, temperatura, oxígeno disuelto, bacterias coliformes, aceites y grasas, sólidos disueltos, turbiedad, color, olor y sabor, nutrientes (nitrógeno y fósforo), materia sedimentable y sustancias tóxicas (Athie Lambarri, 1987).

El agua debe ser tratada de acuerdo al tipo de contaminantes que contiene y al uso que se le dará. Por ejemplo, el agua subterránea viene a veces contaminada con arsénico, plomo u otros materiales; por ello debe ser sometida a un tratamiento especial si será destinada al consumo humano (Gelover Santiago, 2013).

En México, en el 2009 se contaba con 1,510 sitios de monitoreo de la calidad del agua, ubicados en zonas con alta influencia antropogénica y operados por CONAGUA, los cuales consideran principalmente tres indicadores: Demanda Bioquímica de Oxígeno a 5 días (DBO<sup>5</sup>), Demanda Química de Oxígeno (DQO) y Sólidos Suspendidos Totales (SST), mismos que pueden indicar la contaminación en los cuerpos receptores (Comisión Nacional del Agua, 2014).

Para el 2010, 41% de los ellos mostraban una calificación de Excelente para el factor de DBO<sub>5</sub>, el 28.3% para DQO y el 53.5% para SST. La puntuación del resto de los lugares variaba, permitiendo a su vez identificar 21 cuencas que fueron clasificadas como Fuertemente Contaminadas, entre ellas las del valle de México (Comisión Nacional del Agua, 2014).

Con esto también se estableció que las cuatro cuencas hidrológicas con mayor cantidad de inundaciones son: Norte de Veracruz, el Valle de México, el Bajo Pánuco y el Río la Laja. Con esto se concluyó que la región con el balance hidrológico más desfavorable es la del valle de México, correspondiente al Distrito Federal y parte del estado de México (Athie Lambarri, 1987). Por esto, el presente trabajo se desarrolló en esta región, específicamente en el Estado de México.

Este panorama indica que es necesario comenzar a implementar sistemas individuales de tratamiento de agua dentro de las edificaciones a fin de que el problema deje de aumentar. Sin embargo, el proceso de selección de una estructura de este tipo es complejo y requiere tomar en consideración principalmente cinco factores: (Martínez González, 2010)<sup>52</sup>

---

<sup>52</sup> La información expuesta es un resumen de la información expuesta por el autor en su artículo.

1. **La inversión económica:** El costo de uno de estos sistemas es algo que se debe valorar a profundidad, sobre todo si se desea implementarlo en un único edificio. Una opción es hacer que el sistema atienda a varias edificaciones, por ejemplo al interior de una unidad habitacional. Sin embargo, el problema es lograr la cooperación de todos los usuarios.
2. **La cantidad de agua a tratar:** Se debe decidir si se tratará toda el agua producida o solo una parte; así mismo se debe planificar el proceso a seguir en caso de un aguacero.
3. **Variación en el flujo del agua:** Este factor debe considerarse de acuerdo al uso del edificio donde se implementará el sistema de tratamiento. Por ejemplo, en las casas habitación o en las escuelas, se presentan horas pico en donde albergan a más usuarios al mismo tiempo, así como su contrario. También deben considerarse si existirán días o períodos de tiempo de producción nula de agua dado que esto impacta directamente en la elección.
4. **Tipo y cantidad de contaminantes en el agua a tratar:** Este punto puede determinarse con un estudio de laboratorio, sin embargo, a menos de que se genere algún contaminante específico dentro del edificio (grasa, etc.), no es factor de alto impacto en la selección.
5. **Uso futuro/calidad del agua que se desea obtener:** Los límites permisibles de contaminantes varían de acuerdo a este punto, tal y como se aprecia a continuación.

Tabla 9.- Límites permisibles de parámetros comparativos, según las normas NOM-001-SEMARNAT-1996, NOM-015-CONAGUA-2007 Y NOM-003-SEMARNAT-1997			
Parámetros	Infiltración artificial de agua a los Acuíferos	Servicios al público con Contacto Indirecto*	Servicios al público con Contacto Directo**
<i>(miligramos por litro)</i>	<i>Promedio mensual</i>		
Grasa y aceites	15	15	15
DBO5	150	30	20
Sólidos sedimentables	2	2	1
Sólidos Suspendidos totales	150	30	20
Nitrógeno total	40	60	40
Fósforo total	20	30	20
Coliformes fecales (NMP/100 mL)	No detectable	1,000	240

\*Se entiende por “*Servicios al público con contacto indirecto*” como aquellos destinados a actividades donde el público usuario esté expuesto indirectamente o con contacto físico incidental. Ejemplo: Riego de áreas verdes o barreras hidráulicas de seguridad.

\*\*Se entiende por “*Servicios al público con contacto directo*” como aquellos destinados a actividades donde el público usuario esté expuesto al contacto físico. Ejemplo: Llenado de fuentes o lavado de vehículos.

Fuente: La información expuesta es una recopilación obtenida de las normas mexicanas NOM-001-SEMARNAT-1996, NOM-015-CONAGUA-2007 Y NOM-003-SEMARNAT-1997

Como se pudo apreciar, la calidad de agua necesaria para actividades que conllevan el contacto con usuarios, es mayor que la indispensable para la infiltración a los acuíferos. Sin embargo, a su vez se debe considerar que para obtener mayor calidad, se requiere incrementar la cantidad y/o capacidad de remoción de contaminantes de los sistemas de tratamiento a los que será expuesta el agua, aumentando con ello los costos del proceso.

En este caso, con base en la anterior tabla, se determinó que el uso que se desea dar al agua tratada por el prototipo de esta investigación, se clasifica dentro del tipo “Servicios al público con Contacto Indirecto” ya que se busca que esta se emplee en el riego de áreas verdes o para los mingitorios.

No obstante, cabe mencionar que con base en el lugar en donde se realice la colocación del sistema dentro del edificio, para terminarla y lograr su completo funcionamiento, esta requerirá hacer adaptaciones sobre la instalación sanitaria y/o hidráulica de la edificación así como posiblemente, la integración de una bomba de agua, lo que significaría la generación de un gasto eléctrico.

Todos esos puntos, si bien son muy importantes, no serán abarcados por este trabajo debido al tiempo con el que se cuenta para concluirlo. Sin embargo, se pueden convertir en temas centrales de futuras investigaciones, especialmente el de lograr sustituir la bomba por otros materiales que pudieran realizar el mismo trabajo pero sin la necesidad de realizar un gasto eléctrico.

## CAPÍTULO III

### El déficit de áreas libres en la zona metropolitana del Valle de México. La modulación de los humedales artificiales como estrategia para su implementación

En los últimos sesenta años, a partir sobre todo de la revolución industrial, las ciudades han sufrido evoluciones dignas de analizarse por separado de las ocurridas en las diversas épocas históricas previas a esta.

Fue a partir de este punto y con el ingreso de la producción en masa a la industria sumado al nacimiento y/o aumento de las zonas industriales y las fábricas, que se inició una enorme migración de población del campo a la ciudad y por ende, un crecimiento desaforado de las ciudades. Esto causó el rápido surgimiento de problemas de urbanización, crecimiento y zonificación, a los que los arquitectos de la época hicieron frente con nuevas propuestas (López de Lucio, 2013).

Algunas de las más famosas, fueron las realizadas por Charles Édouard Jeanneret-Gris, mejor conocido como Le Cobusier. Él propuso que el crecimiento ideal de las ciudades a futuro, se daría si se las dividía en cuatro sectores: vivienda, industria, comercio y recreación<sup>53</sup>; los cuales debían estar claramente diferenciados pero interrelacionados, buscando con ello una mejor calidad de vida para los usuarios.

Un ejemplo de lo anterior es su propuesta sobre la vivienda de los trabajadores de las fábricas, en la que ellos debían vivir lo suficientemente cerca de las empresas para evitar que estos hicieran amplios recorridos todos los días para llegar de un punto a otro.

No obstante, a pesar de que se realizaron muchas propuestas, el crecimiento de las ciudades y la inmigración de las personas a la ciudad, terminó por superar (en la mayoría de los casos) cualquier planeación o plan maestro que se tuviera para las mismas, desarrollándose (en la gran mayoría de los casos) sin respetar lineamientos y de manera anárquica (Herce Vallejo, 2013). Un ejemplo de esto es la zona metropolitana del Valle de México.

En la actualidad, el crecimiento desenfrenado de las zonas urbanas ha causado que el término de “ciudad” ya sea insuficiente para nombrarlas. Esto debido más que nada porque estas ya han superado sus límites oficiales y han terminado por fusionar varios territorios, haciendo difícil su denominación y manejo físico y socioeconómico (Ramírez B. , 2006).

---

<sup>53</sup> Le Cobusier (2006) *La ciudad del futuro*. Versión Castellana: Enrique L. Revol. Buenos Aires, Editorial Infinito. p. 80-115

Como ya se explicó brevemente, en el caso de La Ciudad de México, el INEGI determinó llamar a esta área urbana como zona metropolitana del Valle de México (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2012). A continuación se buscará establecer y estudiar a fondo la situación de este lugar ya que fue la sede central de este trabajo de investigación.

### 3.1.- El crecimiento anárquico de la Zona Metropolitana del Valle de México en las últimas cinco décadas

La Zona Metropolitana del Valle de México es un lugar que se encuentra situado en la región central del país, en la posición sur-occidental de la cuenca del Valle de México, dentro del eje neo volcánico. Su mayor promedio de lluvias se presenta entre los meses de julio y septiembre y contiene climas que abarcan desde una zona semiárida al norte, hasta una franja tropical en el sur, presentando unas precipitaciones anuales de 700 mm (Transparencia Medio Ambiente, 2010).

En los últimos cincuenta años, este territorio ha tenido un crecimiento desaforado que se ha llevado a cabo de manera anárquica, ya que a pesar de contar con diversos planes de desarrollo, estos prácticamente no se han respetado a lo largo del tiempo (Álvarez Enríquez, San Juan Victoria y Sánchez Mejorada, 2006). De esta forma, la urbe se desarrolló hacia las periferias, fusionando y absorbiendo a otros territorios, como también hacía al interior de la misma, aumentando su densidad habitacional, lo que se ha visto especialmente reflejado en el aumento de la cantidad de edificios de departamentos multifamiliares existentes (Valicelli y Pesci, 2002).

Este aumento de densidad habitacional fue especialmente fomentado a partir de los años ochenta por los responsables del desarrollo urbano del Distrito Federal, a través de proyectos aprobados en base a los planes y programas de desarrollo vigentes en esa época, cosa que generó enojo y conflictos entre los vecinos residentes quienes querían evitar aquello (Álvarez Enríquez, San Juan Victoria y Sánchez Mejorada, 2006).

Sin embargo, en pro de superar estas protestas vecinales, a partir del año 1986 se crearon y emplearon las “Zonas Especiales de Desarrollo Controlado” (ZEDEC), mismas que para el año 1996 fueron aprobadas y utilizadas en 14 de las 16 Delegaciones (Valicelli y Pesci, 2002).

La suma de todo lo anterior causó que para el año 2004, la Secretaría de Desarrollo Urbano y Vivienda del Distrito Federal declarará que solo en las cuatro delegaciones centrales, se habían

construido 88 202 dos casas en la última década y que la población había aumentado con 190 000 habitantes “nuevos” (Aguilar Juárez, 2011).

Subsecuentemente, el aumento de la población fue uno de los factores que agravaron las problemáticas ambientales de la urbe, poniendo así de manifiesto la necesidad de proteger, conservar e incrementar los espacios abiertos y/o verdes. Si bien esto no solucionará la compleja situación, sin duda contribuiría a mejorar el panorama existente. (Ramírez B. , 2006).

Sin embargo, el desarrollo anárquico de la ciudad en suma a la densidad habitacional, causó el surgimiento de una cultura social donde se explota al máximo cualquier área disponible del territorio, generando con ello la ocupación, degradación y/o desaparición de los espacios públicos y las áreas verdes (Bazart, 2008). Entendiéndose así a los espacios públicos cuyo elemento principal es la vegetación, como los parques (Meza Aguilar y Moncada Maya, 2010).

Esta misma cultura causó el nacimiento de diversos problemas, tales como la mercantilización de los espacios de estacionamiento, los cuales ya no se incluyen necesariamente como parte de los conjuntos habitacionales y/o departamentos y que se han convertido en un fuerte mercado de negocio dentro de la ciudad.

Todo este panorama en conjunto ha propiciado la creación de una imagen urbana en donde las construcciones se encuentran cada vez más amontonadas, sin apenas separaciones y que hace muy difícil, por su poca existencia, el emplear áreas libres de terrenos privados o públicos para la instalación de sistemas para el tratamiento y/o reutilización del agua; aun cuando son estructuras cada vez más necesarias a fin de mejorar el manejo del agua dentro de la Zona Metropolitana del Valle de México.<sup>54</sup>

Es por esto que, determinar un lugar en donde se pudiera colocar uno de estos sistemas para el agua de las edificaciones de esta área, sin necesariamente tener que sacrificar las escasas zonas libres que quedan dentro de la misma (ya sea en los terrenos públicos o privados) se convirtió en uno de los puntos principales a resolver dentro de esta investigación. Por ello, se estudió la división del uso de suelo presente dentro del área de estudio, buscando así establecer las bases a utilizar para esta elección.

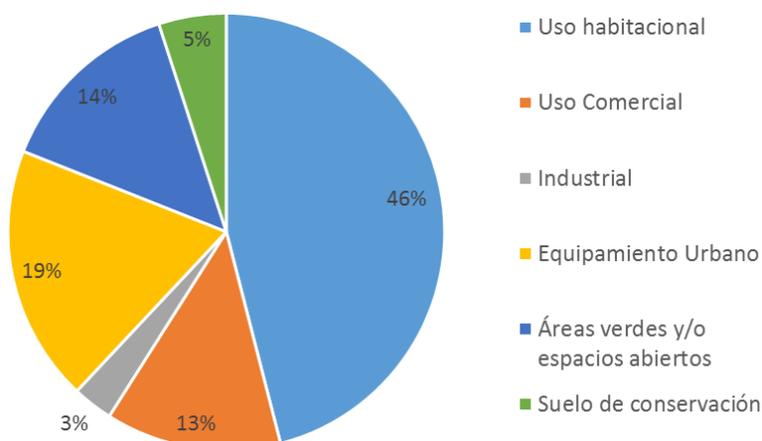
---

<sup>54</sup> Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). (2011). *Modelo de Marco Institucional para la Gestión de Recursos Hídricos en el Valle de México*. Informe de resultados de investigación. Consultado el 17 de enero del 2014. Disponible en: [http://www.agua.unam.mx/sacmex/assets/docs/IDBDOCS\\_GRH\\_ValleMexico.pdf](http://www.agua.unam.mx/sacmex/assets/docs/IDBDOCS_GRH_ValleMexico.pdf)

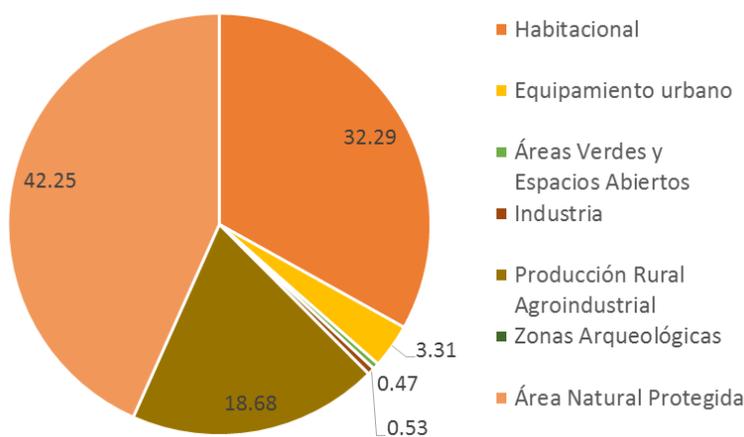
### 3.2.- Análisis de los tipos y tamaños de los terrenos existentes en la Zona Metropolitana del Valle de México

En la Zona Metropolitana del Valle de México, la traza urbana se compone de múltiples territorios con diversos usos de suelo. La cantidad y/o porcentajes de la presencia de estos usos, varían en cada delegación o área conurbada de la urbe, sin embargo, al estudiar la información proporcionada sobre el tema por el Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal (INAFED), se pueden apreciar las diversas tendencias existentes dentro del mismo.

A continuación se aprecian las gráficas que representan los usos de suelo existentes en las delegaciones de Iztapalapa y Xochimilco, las cuales se ubican en la zona central y periférica del área de estudio, respectivamente. En base a ellas se puede apreciar la situación general existente.



**Figura 11.- Gráfico de porcentaje de utilización de uso de suelo dentro de la delegación Iztapalapa.** Gráfica de realización propia basada en la información proporcionada por el INAFED, en su página web: [www.inafed.gob.mx](http://www.inafed.gob.mx)



**Figura 12.- Gráfico de porcentaje de presencia de los diversos usos de suelo en la delegación Xochimilco.** Gráfica de realización propia basada en la información proporcionada por el INAFED, en su página web: [www.inafed.gob.mx](http://www.inafed.gob.mx)

Con respecto a las clasificaciones de uso de suelo presentadas en las gráficas, cabe aclarar: la denominada “Uso comercial” se refiere a todos los locales comerciales, con manejo por parte de pequeña, mediana o gran empresa; así mismo, “equipamiento urbano” se refiere a todas las edificaciones (en su mayoría manejada por parte del estado), predominantemente de uso público, en las que se proporcionan a la población los servicios necesarios para el bienestar social y apoyo a las actividades económicas<sup>55</sup> (Gobierno del Estado de Chihuahua, 2009).

Por otro lado, el rango “Industrial” alude a la concentración de industria mediana y/o pesada y el término de “áreas verdes y/o espacios abiertos” ya ha sido definido anteriormente (Meza Aguilar y Moncada Maya, 2010)<sup>56</sup> por lo que para mayor información debe ser revisado el subcapítulo anterior.

Con base en todo lo anterior, se concluyó que las áreas y/o edificaciones destinadas al uso habitacional, son las que dominan el área de las delegaciones analizadas. No obstante, un comportamiento similar se pudo apreciar en el resto de la Zona Metropolitana del Valle de México.

Ahora bien, la actual división de suelo también es fruto de los diferentes dueños que pueden tener los terrenos del área urbana. En ese sentido, debido al sistema económico capitalista que predomina a nivel mundial, se pueden dividir a los propietarios en tres tipos:

1. **Gobierno:** Este organismo es parte fundamental del Estado. Se encuentra integrado por muchas instituciones cuyo objetivo común es lograr y/o mantener la organización y funcionamiento del país en general.<sup>57</sup>
2. **Instituciones privadas y/o empresas:** Estas pueden estar dedicadas a cualquier tipo de rubro y, en la mayoría de los casos, su principal objetivo es generar ganancias económicas para garantizar su subsistencia.
3. **Población en general:** Esto se refiere a los habitantes que, apoyados por alguna institución o de manera individual, adquieren alguna propiedad dentro de la ciudad para su uso personal (normalmente de forma habitacional).

---

<sup>55</sup> En este uso de suelo se incluyen áreas tales como la central de abasto, panteones, reclusorios, hospitales regionales y los considerados como “servicio inmediato” tales como escuelas de educación básica y mercados. Instituto Nacional para el Federalismo y Desarrollo Municipal (INAFED).

<sup>56</sup> Subcapítulo 3.1.- El crecimiento anárquico de la Zona Metropolitana del Valle de México en las últimas cinco décadas. p. 45.

<sup>57</sup> Gobierno del Estado de México (2014) *Misión, visión y Objetivos*. Disponible en la página de la institución: [http://sgg.edomex.gob.mx/mision\\_vision\\_objetivos](http://sgg.edomex.gob.mx/mision_vision_objetivos)

Debido a sus atribuciones, es natural que el gobierno posea y maneje diversas propiedades a las que se les suele dar un uso público, como la generación de escuelas u hospitales. No obstante, dado que esta institución funciona como representante de la población, los terrenos que ocupa suele seleccionarlos desde las planeaciones de los planes de desarrollo de las ciudades, por lo que no suele remunerar económicamente a otros dueños o lo hace por bajos costos (Ramírez B. , 2006).

Las instituciones privadas se dividen en las que tienen o no fines de lucro. Las que si lo tienen han contribuido a la creación de proyectos multifamiliares y utilizan un sistema en donde, tras conseguir la propiedad de un terreno, generan construcciones de departamentos en las que conviven un gran número de familias que comparten propiedad del lote (López de Lucio, 2013).

Esto último, nos lleva al tercer tipo de propietario: la población en general, y aunque estos son los que se encuentran en mayor cantidad, lo cierto es que de manera individual cada uno suele ser dueño únicamente del lugar que habitan o de alguna pequeña construcción comercial (locales) y en algunos casos, ambos.

Ahora bien, a pesar de que en la Zona Metropolitana del Valle de México, las áreas habitacionales pertenecen en su mayoría a la población en general (con propiedad individual o compartida), están conformadas por terrenos que, por lo general, son pequeños (López de Lucio, 2013). Esto se debe principalmente a dos motivos:

- ***El costo del metro cuadrado de terreno:*** el cual para el año 2010 era mínimamente de quince mil pesos (Aguilar Juárez, 2011).
- ***El poder adquisitivo de la población:*** En el caso del Ciudad de México para el año 2014 el Producto Interno Bruto por habitante (PIB per cápita) equivalió a 22 mil 822 dólares, sin embargo, esto sólo representa dos terceras partes de los 34 mil 427 dólares por persona registrados en Mississippi, el estado con el nivel más bajo en este indicador de Estados Unidos (Villegas, 2015). No obstante, este lugar se encuentra entre las tres entidades federativas con mayor PIB per cápita a nivel nacional. Por último, dentro de la Ciudad de México la delegación con mayor PIB per cápita es Benito Juárez y la del más bajo es Milpa Alta (Cámara de Diputados, H. Congreso de la Unión, 2009).

Por otra parte, si bien el gobierno y las instituciones privadas son dueñas de menor cantidad de terrenos, los que poseen estos son de mayor extensión y en realidad es en estos lugares donde se realizan las actividades que conllevan el funcionamiento vertebrar de la ciudad (Bazart, 2008).

Las causas que desarrollaron esta división desigual de los terrenos son variadas pero una de las principales es la densidad de reurbanización existente dentro de la urbe, pues esto generó que al buscar el máximo aprovechamiento de todas las áreas de los terrenos, estos aumentarán de costo económico, lo que permite que los terrenos de mayor extensión solo puedan ser adquiridos por aquellos que poseen un mejor poder económico (Soto Montes de Oca, 2007).

Esta situación fomentó aún más el déficit de áreas libres y aumentó el problema para encontrar sitios para la instalación de sistemas de tratamiento de agua (a pesar de todas las ventajas que ello podría crear), dado que al ser el valor del terreno tan elevado, la inversión para esta clase de proyectos también creció y dejó de ser una prioridad.

Lo anterior ha prevalecido a pesar de que han existido muchos planes y proyectos para mejorar la situación del manejo del agua dentro de la ciudad, debido a que este objetivo se ha perseguido muy tímidamente y a que la demanda sigue creciendo. Como resultado de esto sigue habiendo un desequilibrio entre la oferta y la demanda de agua, sin embargo, este panorama no mejorara de fondo si no se recurre a la educación ambiental, además del empleo de nuevas tecnologías. “Solo una mejor educación ambiental puede contrarrestar el peso de la historia y la inercia que conlleva” (Cabrera-Marcet, 2015).

Por todo esto finalmente se eligió como objeto de estudio particular a los edificios educativos, debido a que cuentan con factores propicios (áreas libres, gran cantidad de usuarios, etc.) para comprobar el funcionamiento del prototipo propuesto en esta investigación, el cual dará tratamiento al agua gris buscando su posterior reutilización o infiltración.

### **3.2.1- Edificios educativos, ciudades miniatura con influencia en la población**

Después de haber explicado cómo se dividen los terrenos entre los diversos tipos de propietarios y el tamaño promedio que estos suelen tener, la idea de integrar un sistema de tratamiento de agua gris a los empleados para uso habitacional se volvió realmente compleja.

Por esto, los otros tipos de terrenos que se pueden emplear son aquellos que son propiedad del Estado o de la iniciativa privada, sin embargo, estos segundos tienen reglamentos propios y metas internas que hacen difícil generar el interés de este rubro hacia realizar inversiones en esta clase de sistemas (Aristimuño, 2010). Además, de realizarse la instalación en un edificio de este

tipo, se corre el riesgo de que la tecnología no sea dada a conocer a la población en general, con lo que no se lograría la educación ambiental deseada.

Considerando todo lo anterior, se convirtió que la mejor opción era el implementar el prototipo de humedales artificiales en un edificio que funcione como equipamiento urbano, dado que en ellos la población general tiene mayor acceso y existen mayores posibilidades de que se interesen en esta clase de sistemas, abriendo la posibilidad de que a futuro estos sistemas se utilicen en mayor cantidad dentro de las edificaciones habitacionales (Bazart, 2008).

Con base en esta decisión, se procedió a estudiar los tipos de edificios de equipamiento urbano, los cuales son: equipamiento para la salud, educación, comercialización y abasto, administración, seguridad y servicios públicos, y por último, cultura, recreación y deporte (Instituto Nacional para el Federalismo y Desarrollo Municipal (INAFED)).

De entre todos estos, el que tiene mayor potencial para influenciar e impactar de manera positiva a la población, es el de educación. Esto se debe a que la cantidad de alumnos y maestros que conviven diariamente en ellos terminan por transmitir en mayor o menor medida los conocimientos que adquieren en estos recintos, lo que representa una oportunidad para lograr influenciar e impactar a un porcentaje mayor de la población (Valicelli y Pesci, 2002).

Ahora, se debe aclarar que para este trabajo se utilizará como definición de “centro educativo” no cualquier tipo y nivel de escuela, si no que específicamente se empleará para referirse a escuelas que sean de orden público y de nivel primaria o mayor.

Por otro lado, los espacios educativos son edificaciones con importante rol social que tienen gran peso dentro de la estructura de las ciudades y su traza urbana. Todo esto refuerza la idea que para lograr un proyecto destinado a impactar en la cultura de la población general, el ser aplicado primeramente dentro de las escuelas, es una gran opción (López de Lucio, 2013). Un ejemplo de esto es el hecho de que las campañas en contra de la violencia (intrafamiliar, escolar, etc.), tienen como una de sus prioridades transmitir su mensaje dentro de las escuelas, pues se sabe que los conocimientos impartidos en este lugar, terminan por llegar a gran parte de la población y no solo a los alumnos.

Por ello, cuando se trata de intentar concientizar a la población sobre nuevas tecnologías, un paso muy indicado es ingresarlo a través de las instituciones educativas, para que así los alumnos las conozcan, se interesen y divulguen la información. Además, estos también permiten contar con los espacios libres necesarios para la instalación y/o experimentación de estas.

Lo cierto es que los centros educativos, al tener sus propios reglamentos y sistemas administrativos, son una especie de mini ciudades dentro de las urbes que pueden emplearse como muestra para entender cómo podría funcionar y/o impactar las tecnologías en estas.

Al considerar la suma de todos estos factores y los recursos con lo que se contaba para realizar esta investigación, se determinó que el caso de estudio que se utilizaría como base, sería la azotea del edificio de centro tecnológico de FES Aragón. Una vez elegido, se investigó la situación en la que se encuentra el lugar con respecto a la escasez hídrica.

### **3.2.2.- Caso de estudio: Facultad de Estudios Superiores Aragón**

La Facultad de Estudios Superiores (FES) Aragón es una entidad académica multidisciplinaria de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), ubicada en la zona norte del municipio de Nezahualcóyotl, Estado de México. Su dirección es Av. Rancho Seco S/N, en la colonia Impulsora Popular Avícola, C.P. 57130 y cuenta con aproximadamente 60,541 m<sup>2</sup> de construcción.

El municipio de Nezahualcóyotl tiene historial de sufrir las problemáticas de escasez hídrica (especialmente agravado al oriente del mismo) e inundaciones y en las cercanías de la FES Aragón, se encuentra el río de los Remedios; el cual es un constante foco de inundaciones en la época de lluvias (Peralta Moreno, 2001).

Los terrenos donde fue edificada la institución son originalmente lacustres, siendo partes del área que ocupaba originalmente el lago de Texcoco y por tanto, tienen una alta concentración de sales en el suelo. También presenta un clima seco, lo que lo hace idóneo para el crecimiento de plantas tales como las cactáceas.

El agua potable que abastece a la FES Aragón proviene de pozos profundos situados en la zona del lago de Texcoco y llega a través de un acueducto denominado Peñón-Texcoco (Rodríguez Bayon, 2009). El punto de alimentación de agua potable de la institución, se ubica sobre la avenida Rancho Seco, a la altura de la caseta de vigilancia del estacionamiento para alumnos.

El sistema interno de distribución de agua de la institución se basa principalmente en tres cisternas de almacenamiento: una principal ubicada en el sótano del edificio de mantenimiento, con capacidad de 180 m<sup>3</sup> y dos secundarias ubicadas en el Módulo de Extensión Universitaria (de 54 m<sup>3</sup>) y en el Centro Tecnológico Aragón (de 150 m<sup>3</sup>) respectivamente. “Además de las

mencionadas, existen otras dos cisternas ubicadas a un costado del área de baños y vestidores, que en conjunto almacenan 838 m<sup>3</sup>” (Martínez González, 2010).

A pesar de la infraestructura ya mencionada, en la Facultad existe un fuerte problema de escases hídrica, el cual se incrementa especialmente en la época de estiaje, correspondiente de diciembre a abril. En general, el caudal de alimentación de agua a la institución es irregular, insuficiente y a veces suspendido. En consecuencia, el riego de áreas verdes es limitado y se deben cerrar algunos baños para disminuir el riesgo de contraer y propagar enfermedades entre la comunidad universitaria de Aragón.

En el año 2009, bajo el proyecto “*Programa de Manejo, Uso y Reúso del Agua en la UNAM, PUMAGUA*”, se realizó un estudio a profundidad del sistema de distribución de agua potable de la FES Aragón (PUMAGUA, 2010), el cual determinó que las causas internas que aumentan la falta de agua del lugar son:

1. La red rebasa por mucho la vida útil considerada para un sistema de distribución de agua potable, de 20 años.
2. La mayoría de las instalaciones de la facultad son abastecidas a partir de los equipos del edificio de mantenimiento.
3. Los asentamientos de los edificios afectan las conexiones de las tuberías en las cajas de operación.
4. Las fugas en la red de distribución se han incrementado en los últimos años, ocasionadas por los hundimientos diferenciales y los diferentes tipos de materiales que conforman dicha red.
5. La vegetación afecta la estabilidad de las tuberías, al modificar las condiciones de trazo y profundidad de las mismas.
6. La erosión en las áreas de tránsito ha reducido el colchón de suelo sobre las tuberías, el cual las protege de las cargas superficiales.
7. Los materiales de relleno utilizados en la reparación de fugas no son los apropiados.

En busca de encontrar una manera de mejorar la problemática de escasez hídrica existente, se estudiaron diversos tipos de tratamientos de aguas para analizar las posibilidades de instalación de los mismos en la institución, sin embargo, se concluyó que las características físicas y de funcionamiento de la misma, no son compatibles con la mayoría de los sistemas de tratamiento comerciales.

Por ejemplo, la instalación de un sistema de tratamiento de lodos activados (el más utilizado en el país), no es viable debido a su vulnerabilidad a las variaciones de flujo de agua, circunstancia muy recurrente en la facultad. Esto causaría problemas en la estructura y una fuerte disminución del tiempo de vida del producto.

Una de las propuestas más viables planteadas para aminorar las problemáticas hídricas de la FES Aragón, fue la de colocar humedales artificiales. Sin embargo, a pesar de que era económica y técnicamente viable, al realizar el cálculo del área de terreno que necesaria para el proyecto<sup>58</sup> (los metros dependen de la cantidad de agua y contaminantes a tratar), resulto ser equivalente a cuatro de los edificios educativos ya existentes, volviendo inviable la propuesta.

### 3.3.- Diseño de un prototipo modular de humedales artificiales: respuesta al déficit de áreas libres, considerando la simplicidad y comodidad de instalación.

Por toda la información ya expuesta, la propuesta del área de instalación se convirtió en un reto que impactaría de manera primordial en el diseño final del prototipo a realizar. Si bien es cierto que la FES Aragón y los centros educativos casi por lo general, cuentan con áreas libres que podrían emplearse para llevar a cabo la instalación del prototipo, dado que se espera a futuro poder integrar el sistema a los edificios habitacionales, la ubicación debería ser una que pudiera ser aplicable también a este otro tipo de edificaciones.

Ahora bien, otro elemento que se tomó en cuenta en esta selección fue la actual situación social, en la que, factores como la seguridad o la búsqueda de la privacidad a causado que los usuarios prefieran situar sus posesiones de mayor valor en lugares sin acceso general para las personas. No obstante, esto beneficia al sistema de humedales artificiales ya que contribuye a que los dueños posean mayor control sobre estos, evitando así accidentes tales como el ingreso de solidos de gran tamaño a la estructura, mismos que pudieran reducir o dañar su funcionamiento.

En consideración de todo lo anterior y tras analizar varias opciones posibles, se concluyó que la opción más viable de lugar para realizar la instalación de un prototipo de sistema de humedales artificiales es en las azoteas de los edificios, dado que esta ubicación proporciona ventajas únicas que aumentan el valor potencial del sistema y de su instalación:

---

<sup>58</sup> Como ya se explicó en el primer capítulo, los metros cuadrados necesarios para el funcionamiento del sistema, dependen de varios factores, entre los que se encuentra la cantidad de agua y contaminantes a tratar.

1. Utilización de un área que no se utiliza en el 90% de las edificaciones.
2. Generación de una azotea verde de naturalización indirecta y del beneficio económico que acarrearán. Desde el año 2011 en el Distrito Federal, se ofrece hasta un 25% de descuento en el impuesto de predial a los propietarios de edificaciones que coloquen esta clase de sistemas.
3. Mayor aislamiento térmico al interior de la edificación y generación a consecuencia, de un ambiente interno con mayor confort para los usuarios.
4. Tratamiento de las aguas grises que se generen en los edificios en donde sean instalados para poder reutilizarla y aminorar la escasez hídrica interna.

La propuesta de instalación de humedales artificiales en azoteas es viable para FES Aragón porque estas áreas no tienen un uso en particular para la facultad pero si una escalera de servicio que permitiría al personal acceder al sistema para realizar revisiones o mantenimiento. Sin embargo, la implementación en azoteas (tanto en la FES Aragón como en las edificaciones en general) plantea retos que una instalación a nivel de suelo no, siendo las principales:

- El peso final del sistema ya saturado, debe ser el menor posible para no forzar la estructura interna del edificio en donde sea colocado.
- Se debe realizar un estudio de la estructura de la edificación y su resistencia, a fin de establecer un límite claro sobre cuál es la carga máxima que puede soportar la misma sin comprometer la seguridad de los usuarios.
- Se requiere planear y diseñar todas las instalaciones necesarias tanto para subir el agua, como para disponer de ella una vez tratada. Así mismo se debe considerar que será necesaria la colocación de una serie de pre tratamientos de agua (fosa séptica, desarenador, etc.) para garantizar que al sistema solo ingrese agua gris sin sólidos que pudieran dañar el funcionamiento interno del mismo.

Lo anterior permite entender la gran importancia que tiene la relación entre el peso final del sistema con respecto a la resistencia de la estructura interna de la edificación. Es por eso que este punto se convirtió en la consideración central del desarrollo del diseño del prototipo de esta investigación y de la realización de la experimentación.

Con todo esto, finalmente se pudieron resumir todos los factores a considerar para realizar el diseño de un prototipo que dé respuesta a todas las problemáticas previamente analizadas:

- 1. Debe incluir un sistema de humedales artificiales sub-superficiales:** Se concluyó en el primer capítulo de esta tesis que de los dos tipos de humedales artificiales, el de mejor eficiencia y compatibilidad con las zonas urbanas, es el de flujo sub-superficial (Delgadillo, Camacho, Pérez y Andrade, 2010). Además, este sistema requiere menor inversión económica que otros, como los lodos activados, para su instalación y mantenimiento.
- 2. La calidad del agua de salida del sistema:** Dado que se pretende utilizar el agua tratada para el riego de áreas verdes y uso escusado, la calidad requerida es menor. Sin embargo, dado que se busca reducir el peso final del sistema, que la profundidad mínima recomendada para un humedal artificial es de 30 cm y que esta misma medida ha demostrado contribuir a la desnitrificación del agua (Lahora, 2003).
- 3. Debe poder instalarse en las azoteas:** La colocación en este lugar es una respuesta al Déficit de áreas libres existente en la Zona Metropolitana del Valle de México.
- 4. El sistema debe superar el problema de la instalación personalizada:** Debe ser un sistema que se pueda colocar de manera simple y que requiera la menor cantidad de personal especializado, esto a fin de reducir los costos de instalación.

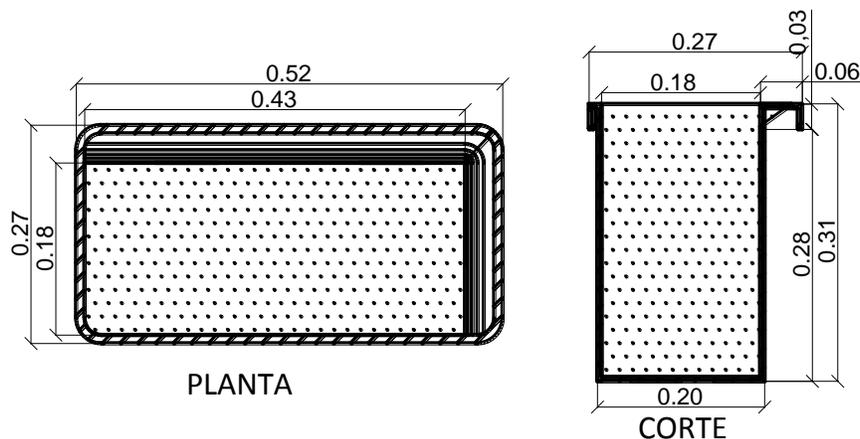
Con base en lo anterior, se propuso **la creación de un sistema modular de humedales artificiales** que pueda ser colocado en las azoteas de las edificaciones, dado que esta solución le otorgaría un mayor potencial de utilización en las edificaciones urbanas por dos motivos: se adaptaría a la forma de cualquier azotea o área libre en donde se pretenda su instalación; además, el sistema podría ir creciendo de acuerdo a las necesidades y/o capacidad económica de los usuarios, de esta forma no están obligados a hacer la inversión completa desde el inicio para generar este sistema de tratamiento, generando mayores facilidades para el usuario.

Una vez se decidió usar sistema modular, también se debieron considerar previamente los siguientes factores para realizar el diseño final del prototipo:

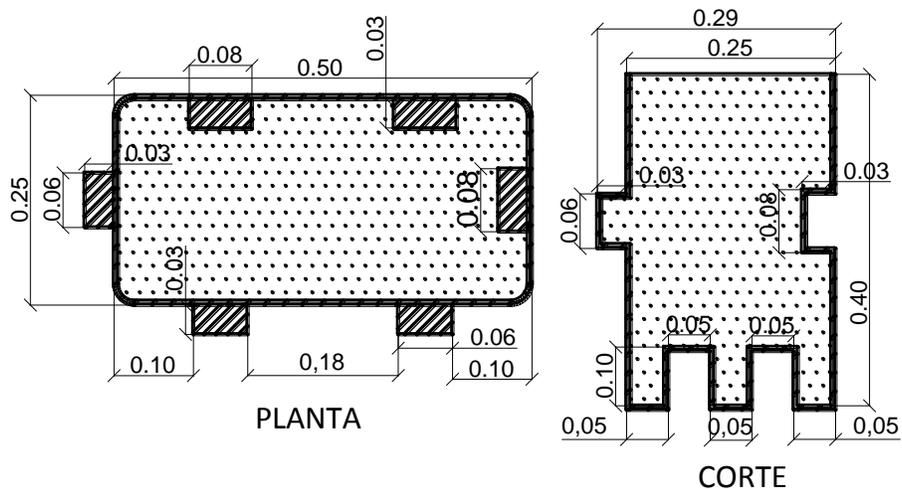
- Procurar generar un sistema sencillo y con facilidad de uniones a fin de que su instalación no sea compleja, reduciendo así la necesidad de mano de obra especializada.
- Las capacidades de tratamiento de agua y el tiempo de retención hidráulico deben ser los óptimos, dado que junto al tipo y nivel del sustrato, son los factores que más influyen en el peso final del prototipo.
- Proponer un modelo que garantice el funcionamiento y aislamiento del humedal artificial.
- La altura del humedal sub-superficial debe ser de 30 centímetros.

- El diseño debió basarse en una forma rectangular ya que esta figura es la que genera menos áreas hídricas muertas, evitando así en la medida de lo posible, el estancamiento de agua y el subsecuente daño al sistema.
- El modelo debe facilitar la conexión de mangueras entre los módulos para garantizar el paso del agua de uno a otro.

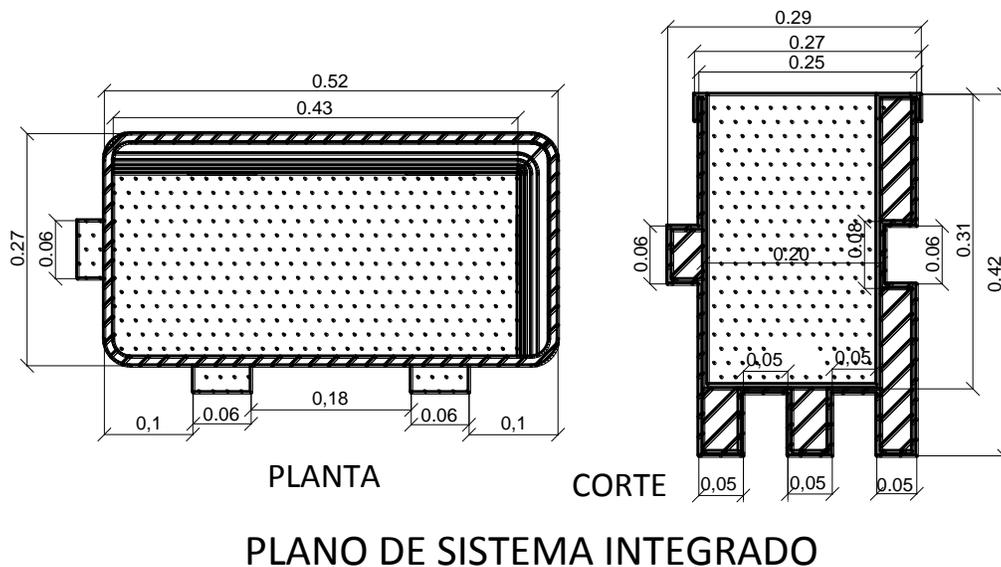
Con base en esto, se realizó un diseño consistente en un módulo compuesto por dos macetas: Jardinera A y B, en la que la pieza A se coloca dentro de la B. La maceta A contendría al humedal y la B funcionaría como aislante, protección y para generar un sistema de interconexión para los módulos. A este diseño se le llamó “prototipo de maceta-humedal”, mismo del que se puede apreciar su forma y medidas a continuación:



PLANO DE JARDINERA A (INTERNA)



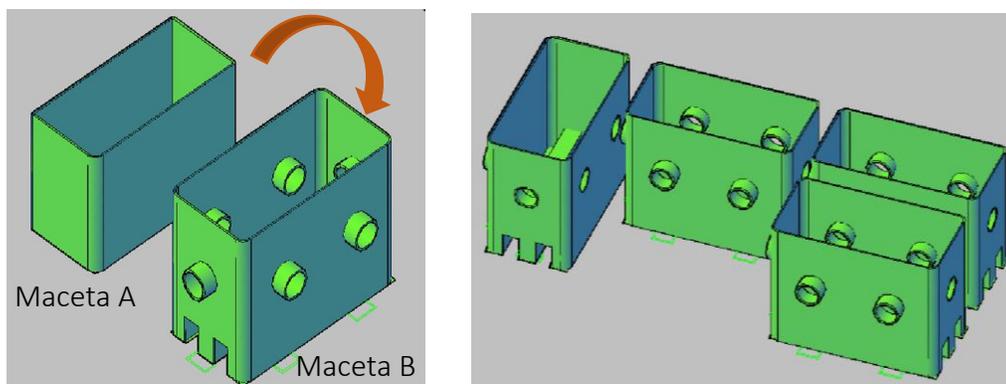
PLANO DE JARDINERA B (EXTERNA)



### PLANO DE SISTEMA INTEGRADO

**Figura 13.-Planos de las macetas para prototipo experimental de maceta-humedal.** Figuras de elaboración propia.

Cabe señalar que el sistema de uniones la maceta B, se genera a través de sus salientes y perforaciones y es de tipo Lego. Esto también permite la creación de una estructura tipo serpentin que garantiza la entrada y salida del agua al sistema, tal y como se puede apreciar a continuación:



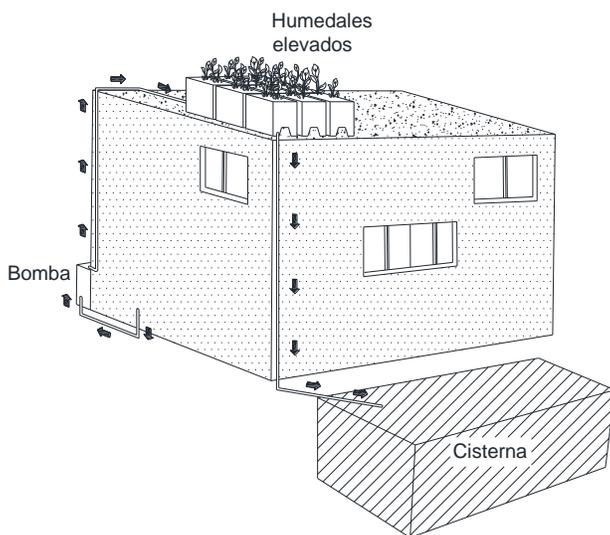
**Figura 14.- Piezas del módulo y juego uniones posibles.** En la Imagen de la izquierda se puede apreciar como la Maceta A se coloca dentro de la B, siendo en la primera donde se desarrolla el humedal artificial. En la de la derecha, la cantidad y tipo de uniones que se pueden generar a través de la forma de la maceta B. Figura de elaboración propia

Tras el diseño de las macetas se plateó el de la instalación completa necesaria para la colocación del sistema en un edificio. Los elementos principales serían:

- a) **Trampas de grasa:** Deben instalarse en el punto donde se unan todas las aguas a tratar o donde se generé la mayor cantidad de este contaminante. La disposición, características y cantidades de aparatos, debe determinarse en cada caso particular.

- b) **Fosa séptica:** La instalación de este elemento es opcional y solo se recomienda en caso de que se desee tratar el agua producida por inodoros o cuando el agua a tratar incluya fuertes cantidades de sólidos. Esto es porque esta clase de contaminantes puede obstruir el sistema de los humedales artificiales, reduciendo así su tiempo de vida.
- c) **Bomba:** Este aparato será el encargado de transportar el agua desde el nivel del suelo a la azotea. Es necesario utilizar un modelo de bomba acorde al tipo de agua que subirá.
- d) **Depósito de agua gris:** Se trata de un tanque o similar, colocada en la azotea de la edificación en donde el agua espera para ingresar por gravedad a los módulos de humedales artificiales. La colocación de este elemento es opcional y depende totalmente de la cantidad de agua que genera la edificación y de que tan regular sea la producción de la misma.
- e) **Módulos de humedales artificiales elevados:** Su funcionamiento ya ha sido aclarado. El agua ingresa por un extremo y sale por el otro luego del tratamiento.
- f) **Cisterna:** En este lugar el agua ya tratada se almacena antes de ser reutilizada en riego de áreas verdes u otras actividades que no signifiquen contacto directo con las personas.

Con base en los elementos ya mencionados, a continuación se puede apreciar una imagen donde se aprecia un esquema muy sencillo que muestra el funcionamiento general del sistema y el recorrido que realizaría el agua dentro de él.



**Figura 15.- Imagen ilustrativa de las principales componentes del sistema, así como sus respectivas ubicaciones. Figura de realización propia.**

Una vez se contó con todo el diseño anterior, se pudo pasar a la elaboración y ejecución de la experimentación sobre el prototipo.

## CAPÍTULO IV

### Prototipo modular experimental de maceta-humedal en la Facultad de Estudios Superiores Aragón, UNAM

#### 4.1 Metodología del experimento

A raíz de toda la base teórica del proyecto, se determinó que el lugar donde se buscaría lograr la instalación de un prototipo de humedales artificiales en la azotea de los edificios pero el principal problema de esto es el peso del sistema, por ello el experimento de esta investigación tuvo como objetivo principal reducir el mayor porcentaje posible este factor.

Para ello, partiendo de investigaciones pasadas,<sup>59</sup> se estableció que de los tres componentes de los humedales artificiales (plantas, contenedor y sustratos) aquel que abarca la mayor área de estos es el sustrato, por ello, el empleo de sustratos ligeros en la construcción futura de esta clase de sistema, generaría una reducción en el peso final del mismo.

Teniendo esto en mente, se decidió que el experimento giraría en torno a la realización de una comparativa entre tres humedales artificiales generados de manera con la única diferencia de que se emplearían sustratos diferentes en cada único. El motivo para emplear un solo tipo de sustrato en cada humedal, en lugar de la mezclas de varios materiales fue para el diseño del prototipo fuera lo más fácilmente reproducible, a fin de poderse replicar sin necesidad de mano de obra especializada.

Por ello, con base en lo realizado en investigaciones previas<sup>60</sup> se decidió utilizar para realizar la comparativa a la perlita y el Tepojal con respecto a los resultados que pudiera arrojar el Tezontle Rojo, dado que este último es un material que ya ha sido empleado en la elaboración de humedales artificiales (Romero, Colín, Sánchez y Ortiz, 2009) y es muy usado como medio filtrante.

El objetivo de esta comparativa es establecer un material con un menor peso granular que tenga las mismas o superiores capacidades de remoción de contaminantes que el tezontle rojo, para

---

<sup>59</sup> Hoffman, Platzer, Winker y Von Muench, 2011. Castro Reis, 2012. Villegas Gómez, 2006. Izembart y Le Boudec, 2003. Márquez Vazquez, Diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales para la escuela nacional de estudios profesionales Aragón, empleando ecotecnologías (humedales artificiales), 2004. Water and sanitation program (WSP) for latin america and the Caribbean, 2007.

<sup>60</sup> Vymazal, 2010. Tanner, Sukias, y Yates , 2010. Sayadi, Kargar , Doosti y Salehi, 2012.

así generar la propuesta de un prototipo de sistema de humedal artificial para azotea con un peso menor. Por esto, a continuación se muestra una breve descripción de estos tres materiales.

El tezontle es una roca de origen volcánico característicamente de color negro aunque también se le encuentra con matices rojizos o anaranjados. Posee bastante dureza y resistencia a pesar de ser porosa, su densidad varía entre 1.2 y 1.6 gramos por centímetro cuadrado y una de sus características es que acumula el calor además de que su porosidad permite la infiltración del agua (Rodríguez Díaz, Salcedo Pérez, Rodríguez Macias, González Eguiarte y Mena Munguía , 2013)

Por otro lado, el tepojal es material derivado de la espuma volcánica y por ello cuenta con una alta porosidad y poco peso. Es adecuado para generar drenaje en los suelos y realizándole cribados con mallas de distintos calibres, se pueden obtener granulometrías adecuados para diversas especies o tamaños de plantas (CLADIMACO, 2016). En el caso de este ensayo se usó una volumetría de 9 a 20 milímetros. Su empleo se debió no solo en consideración de su peso, si no a la facilidad con la que se puede conseguir el material.

Por último, la perlita o agrolita es un material, también de origen volcánico, que tiene una granulometría de 1.5 y 2.3 mm, es de color blanco y se caracteriza por tener un reducido peso a causa de su baja densidad. Además cuenta con una retención de humedad de entre el 40% al 65%,<sup>61</sup> una estructura estable que no se contrae o hincha, un pH neutro y una amplia disponibilidad (Hernández y Lezama, 2015). Su empleo se fue decidido principalmente en base al reducido peso del material, a su accesibilidad y bajo costo.

A continuación se muestra una tabla donde se pueden apreciar los pesos volumétricos de los sustratos empleados en el experimento para los humedales artificiales:

Tabla 10.- Pesos volumétricos de los materiales empleados como sustratos		
Material*	Peso kg/m <sup>3</sup> seco	Peso kg/m <sup>3</sup> saturado
Tezontle Rojo	1250.00	1550.00
Perlita o Agrolita	104.10	504.00
Tepojal	350.00	1100.00

\*Los pesos son aproximados y pueden variar con diferentes granulometrías

Fuente: Marcos Noriega, *Propiedades físicas de los mareiales*, 2009

En cuanto al tema de la forma del humedal, en el capítulo anterior se realizó el diseño de una maceta modular, por lo que prosiguió la elección del material que se emplearía para la

<sup>61</sup> Este porcentaje depende de las características del lote del material y de las físicas y químicas del agua empleada.

elaboración de estas macetas. En esta se tomaron en cuenta un par de consideraciones que fueron apreciadas en el trabajo previo de los investigadores Márquez Vázquez y Martínez González (2011):

1. Los contenedores de los humedales artificiales deben realizarse con un material opaco, puesto que los transparentes propician el crecimiento de algas, afectando el funcionamiento general del sistema.
2. Deben realizarse en un material que cuente con una gran resistencia a las cargas y a la presión hidráulica.
3. Debido a que se busca generar un modelo de humedal artificial con un peso reducido, el material a elegir debe contar con esta misma cualidad.

Finalmente, habiendo descartado materiales tales como el vidrio o el acrílico, se decidió emplear la fibra de vidrio debido a que, además de cumplir con todos los requerimientos antes mencionados, también cuenta con la accesibilidad necesaria para trabajar con él de manera personalizada. Sin embargo, el manejo de este material representó un reto propio debido al proceso requerido para la realización de cada módulo, mismo que se explica a detalle en el Anexo A.

Los módulos se realizaron en escala 1:1, esto para obtener resultados que no necesitaran escalarse con hojas de cálculo para ser aplicables. Por otro lado, la profundidad que se empleó para los módulos de humedales artificiales fue de 0.30 cm. esto porque es la medida mínima recomendada para esta clase de sistemas (Delgadillo, Camacho, Pérez y Andrade, 2010) y además, el investigador Agustín Lahora (2003) afirmó que “con respecto a la eliminación del nitrógeno en humedales artificiales [...] en algunos casos se han obtenido importantes reducciones, asociadas a un aporte de oxígeno por las raíces de las plantas, en sistemas de poca profundidad (0.3 m)” (pág. 104)

En el caso de la selección del tipo de planta, con base en lo realizado en investigaciones previas, se consideró emplear *carrizos*, *jacintos de agua*, *cuna de moisés*, sin embargo al final se utilizó *alcatraces*, debido principalmente a:

- a) Si bien, los carrizos ya han demostrado sus capacidades de absorción de contaminantes, tienen un crecimiento algo lento que debe entonces compensarse por el sistema completo instalado en la edificación (Izembart y Le Boudec, 2003).

- b) El Jacinto de agua requiere de mucha humedad para su desarrollo, por lo que su utilización se desarrolla con mayor facilidad en humedales artificiales con flujo superficial (Díaz, Atencio y Pardo, 2014).
- c) Dado que se plantea colocar este sistema en las azoteas de las edificaciones, la cuna de moisés se vuelve imposible, ya que el crecimiento de esta planta se da en la sombra no al exterior (Márquez Vazquez y Martínez González, Cuaderno de apuntes "fundamentos teóricos para el diseño de Humedales Artificiales, 2011).
- d) El alcatraz ya ha sido implementado en casos reales anteriores, como en empresas madereras, para ser el último filtro de las aguas tratadas por la industria, previo a su infiltración al subsuelo. Además esta planta aportó un factor estético al sistema, lo que aumenta las posibilidades de réplica del prototipo a futuro en casos reales.

Por otro lado, los alcatraces son plantas que se desarrollan mejor en lugares que cuenten con constante humedad, suelos profundos y abundante materia orgánica (Hernández Hernández, 2013), características que lo vuelven una gran opción para emplearlo en la elaboración de humedales artificiales.

Así mismo, los alcatraces se desarrollan idealmente entre alturas de 600 a 2600 msnm, con temperaturas promedio de 12 a 23 °C y con precipitaciones medias anuales de 1500 a 3000 mm. (Zamorano V., 2009), con lo que se tiene compatibilidad con las características físicas y de clima presentes en la Zona Metropolitana del Valle de México.



**Figura 16.- Alcatraz *Zantedeschia aethiopica*,**  
empleado en los tres módulos de humedal artificial.

Fotografía de realización propia.

El alcatraz que se empleó en el prototipo fue del tipo *Zantedeschia aethiopica*, de la variedad llamada “chilsiana”, el cual pertenece al grupo de alcatraces cuyos bulbos no mueren en todo el año y que pueden llegar a una altura de 60 centímetros (Zamorano V., 2009).

Con base en toda la información antes expuesta, se prosiguió a desarrollar la matriz del experimento la cual se muestra a continuación:

Tabla 11.- Matriz de experimentación aplicada sobre las macetas-humedal				
Altura de Sustrato:	Sustrato: Tezontle Rojo	Sustrato: Agrolita	Sustrato: Tepojal	Planta:
30 cm	1	2	3	Alcatraz

. Figura de realización propia

Con esta la matriz se definió que se generarían un total de tres muestras, con las características antes descritas y las cuales fueron colocadas en la azotea del edificio del centro tecnológico de la FES Aragón, convirtiéndose de esta manera en el edificio muestra. Para evaluar los resultados obtenidos, se empleó un análisis no paramétrico de Kruskal-Wallis para delimitar las diferencias significativas entre los tres módulos de humedales artificiales.

#### **4.1.1.- Instalación del prototipo de maceta-humedal en la azotea del Centro Tecnológico de FES Aragón.**

Una vez que se elaboraron las macetas en fibra de vidrio, se instaló el prototipo en la azotea del edificio del Centro Tecnológico de FES Aragón. Esta se conformó por dos etapas a fin de que los humedales iniciaran lo antes posible su “período de estabilización”. Se conoce de esta manera al período de tiempo requerido para que las plantas se “adapten” a su nuevo contenedor y para que los sustratos alcancen su nivel óptimo en la remoción de contaminantes (Castro Reis, 2012).

Este período es necesario en todos los tipos de humedales artificiales y dependiendo del tipo de planta y materiales empleados, su duración se puede variar. En este trabajo, se determinó que tres o cuatro meses bastarían para poder iniciar las pruebas de laboratorio.

Por esto, la primera etapa de la instalación de los humedales artificiales se realizó el día 20 de noviembre del 2015 y consistió en el trasplante de los alcatrazes a las macetas tipo A en la azotea del edificio muestra y la colocación del sistema de mangueras que permitiría la entrada y salida del agua de los mismos. El día de la instalación se realizó dos procesos previos a la instalación:

1. *Colocación de mangueras y válvulas de paso:* Estas se usaron para controlar el agua que ingresó y salió de los tres módulos. Las mangueras utilizadas fueron de medio centímetro de diámetro y las válvulas del tipo plástico que se emplean en las peceras para regular el paso de oxígeno a las mismas. Se usaron estos materiales por sus tamaños, dado que esto permitió un mejor control sobre la velocidad del agua que ingresó y salió del sistema.



**Figura 17.- Preparación previa de las Macetas A para la primera etapa de la instalación.** Fotografía de realización propia.



**Figura 18.- Mangueras y válvulas empleadas en la instalación del prototipo.** Fotografía de realización propia.

2. *Trasplante de los alcatraces:* Primero, usando agua se limpió toda la tierra en la que se encontraban originalmente las plantas y luego se instalaron dentro de los macetas A, colocando dos alcatraces en cada una junto a su respectivo sustrato.



**Figura 19.- Proceso de limpiado de las plantas.** Fotografía de realización propia

La segunda etapa de instalación se realizó el 18 de enero de 2016 y en ella se integró la maceta B a los módulos, con lo que se completó la impermeabilización del sistema. De esta forma la instalación estuvo completo y se prosiguió al período de estabilización, el cual, una vez cumplido en el mes de marzo, se pudieron iniciar las pruebas de laboratorio.



**Figura 20.- Resultado final de la primera fase de instalación de los módulos de humedales artificiales.** Fotografía de realización propia.



**Figura 21.- Instalación completa de los tres módulos de humedales artificiales tras la segunda etapa de montaje.** Fotografía de realización propia.

#### 4.1.2.- Alimentación y muestreo del prototipo

El proceso de alimentación del prototipo se realizó con agua gris artificial, la cual fue preparada cada día previo a su ingreso al prototipo en el Laboratorio de Ingeniería Ambiental ubicado dentro del centro del Centro Tecnológico de la FES Aragón.

El principal motivo para usar este tipo de agua es que permitió un mejor control sobre la calidad del líquido que ingresaba en los humedales artificiales, logrando así que esta tuviera una cantidad de contaminantes y nutrientes similar en cada alimentación realizada, además de mantener el experimento dentro de parámetros controlados.

Cabe mencionar que este método es frecuentemente empleado en las investigaciones referentes a temas de agua como primera etapa de estudio. Una vez que se logra alcanzar los objetivos fijados para esta etapa inicial, se suele pasar a una segunda donde a los prototipos se les comienza a ingresar agua gris obtenida de fuentes reales.<sup>62</sup> Desgraciadamente por el tiempo disponible para esta investigación, no se logró llegar a este paso. El agua gris artificial se elaboró con tres ingredientes, en proporción 5:1:1, tal y como se aprecia en la tabla 8.

- a) *Agua potable*: Tomada directamente de la llave de agua.
- b) *Leche en polvo*: En el experimento se utilizó de la marca NIDO. La leche aportó a la solución materia orgánica, específicamente del tipo carbonacea, logrando así que el agua potable adquiriera características parecidas a las que posee el agua gris debido a los desechos jabonosos.
- c) *Fertilizante en polvo*: Este material le aportó al agua mayores concentraciones de Nitrógeno (N), Fósforo (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) y Potasio (K<sub>2</sub>O). Estos son tres de los factores que se midieron en las pruebas de laboratorio a fin de determinar el porcentaje de remoción que sufrieron tras recibir el tratamiento biológico de los humedales artificiales. La marca que se empleo fue Happy Flower, el cual tiene el siguiente porcentaje de composición en cada porción (100 g.): Nitrógeno 11.00%, Fósforo 8.00% y Potasio 7.50%

Tabla 12.- Proporción de materiales empleados para la generación del agua gris artificial			
Agua gris artificial (L)	Agua potable (L)	Leche (g)	Fertilizante (g)
5	5	1	1
10	10	2	2
15	15	3	3

Fuente: Márquez Vazquez & Martínez González, Cuaderno de apuntes: fundamentos teóricos para el diseño de Humedales Artificiales, 2011

<sup>62</sup> El tipo de agua ingresada a los prototipos en esta segunda etapa depende del tema que se esté investigando.

Se utilizó una báscula analítica digital para generar la proporción de materiales deseada para crear el agua gris artificial. Se pesaban la leche y el fertilizante y luego se procedió a agregarlos al agua. El margen de variación aceptable para el peso de los materiales era de  $\pm 0.0020$  gramos.



**Figura 22.- Pesado de ingredientes para la elaboración de agua gris artificial.** Fotografías de realización propia.

Durante el experimento, en el mes de mayo se alimentaron con diez litros diarios a los humedales artificiales, los cuales eran repartidos gracias a un contenedor único que proporcionaba agua a los tres módulos. Sin embargo, a partir del mes de junio se instalaron contenedores individuales a cada uno, ingresando en ellos la cantidad de cinco litros diarios. Las características generales del muestreo se describen en la siguiente tabla.



**Figura 23.- Módulos de humedales artificiales con sus contenedores individuales de agua de alimentación y salida.** Fotografía de realización propia.



**Figura 24.- Proceso de alimentación de los contenedores de entrada de agua a los prototipos.** Fotografía de realización propia.

Tabla 13.- Características Generales de Muestreos de Agua	
Tipo de muestra	Muestra de agua
Temporalidad del muestreo	Cada dos días
Número de puntos de muestreo	Cuatro
Descripción de puntos de muestreo	Entrada y salida de los humedales artificiales
Parámetros medidos in situ	Ninguno
Parámetros analizados en laboratorio	DQO, Nitrógeno, Fósforo, Potasio, SST, SSV y SSF

Tabla de realización propia.

El proceso de muestreo se realizó usando frascos de PET con tapa de rosca y 60 mL. de capacidad. Los pasos para esto fueron:

1. Los frascos se introducían directamente dentro del agua ubicada dentro de los recipientes de entrada y salida de los humedales artificiales, esto para garantizar el obtener la mayor calidad de muestra que se pudiera.
2. Con ayuda de un marcador, a cada frasco que se empleó<sup>63</sup> se le escribía la fecha del día, el número del muestreo y una clave para identificar el tipo de agua que contenía.
3. Una vez tomada las muestras de agua, se procuraba llevarlas lo antes posible al laboratorio de impacto ambiental, ubicado en el mismo edificio, en donde se colocaban dentro de un refrigerador con una temperatura de 4 °C. Esto permitía que las muestras se pudieran preservar por un período de hasta ocho días.

Contando ya con las muestras de agua que se fueron tomando de los módulos de humedales artificiales, se prosiguió a iniciar con las pruebas de laboratorio que se habían definido con anterioridad.



**Figura 25.- Proceso de toma de muestras de agua de los recipientes de salida de agua tratada.** Fotografía de realización propia.

<sup>63</sup> Los cuales podían ser un máximo de cuatro por muestreo, ello considerando que se tomara una muestra del agua a punto de ingresar a los módulos y una de la salida de cada uno de los tres humedales artificiales.

#### 4.1.3.- Selección y listado de pruebas a realizar

Teniendo en cuenta las hipótesis y objetivos de este trabajo, se dividieron los temas que abarcan en cuatro ejes, a fin de poder abordarlos de manera más eficiente. Estos fueron: calidad del agua, Tiempo de retención hidráulico, Ganancia térmica y Resistencia estructural. Luego se determinó de manera individual para cada eje, las diversas pruebas de laboratorio<sup>64</sup> o métodos necesarios para desarrollarlos.

En el caso de la calidad de agua, para definir y comparar la que ingresó y egreso como resultado del tratamiento de los humedales artificiales, se establecieron los valores presentes en ellas con respecto a los siguientes factores:

- a) Demanda Química de Oxígeno (DQO).
- b) Sólidos Suspendidos Totales (SST) Volátiles (SSV) y Fijos (SSF).
- c) Nitrógeno total, Nitratos y Nitritos.
- d) Fósforo Total.
- e) Medición de Ion Sulfato en el agua.
- f) Determinación del pH.

Para establecer Tiempo de Retención hidráulico con el que trabajó el sistema, se realizaron los siguientes estudios:

- a) Porcentaje de porosidad de los sustratos.
- b) Porcentaje de humedad en los sustratos.
- c) Cálculo de la velocidad de entrada y salida del agua de los humedales artificiales.
- d) Cálculo de la precipitación diaria en el área de estudio.
- e) Registro de litros de agua tratada producidos por los módulos de humedales artificiales.

La ganancia térmica obtenida a través de los prototipos se estableció realizando lecturas sobre la temperatura del suelo de la azotea del edificio muestra y comparándolas con las obtenidas en los siguientes tres puntos:

- a) Las periferias de las macetas.
- b) Las bases de las plantas.

---

<sup>64</sup> Todas las pruebas y/o análisis deberían realizarse en base a métodos aprobados por la US Environmental Protection Agency (EPA) o similares nacionales.

c) Debajo de los humedales artificiales.

Por último, para la determinación de las cargas estructurales de los módulos se decidió realizar:

a) Determinación de peso por modulo.

b) Relación peso-aprovechamiento de los tipos de humedales artificiales empleados.

#### **4.1.4.-Procedimientos y seguimiento del prototipo modular de maceta-humedal**

En este subcapítulo, se describirán brevemente los procesos, aparatos y reactivos empleados en la realización de cada una de las pruebas de laboratorio ejecutadas. Cabe reiterar que se emplearon únicamente procedimientos que ya han sido aprobados previamente por instituciones tales como la US Environmental Protection Agency (EPA) o similares nacionales.

##### *4.1.4.1.- Demanda Química de Oxígeno (DQO)*

Con esta prueba se determinó la cantidad materia orgánica e inorgánica total con las que contaban las muestras de agua. Se utilizó como reactivo principal los viales de intervalo HR (20-1500 mg/l) y LR (3-150 mg/l) para la determinación de DQO de la marca HACH.<sup>65</sup> La utilización de uno u otro tipo dependió del tipo de muestra que se hubiera procesado: en las de alimentación de los humedales artificiales, se emplearon los primeros y para las muestras de agua tratada, los segundos.<sup>66</sup>

Se procesaron los dos tipos de muestra para establecer una comparativa entre la cantidad de materia orgánica que contenía el agua antes de entrar a los prototipos y la que tenía a la salida de los mismos. Los pasos que se siguieron para realizar este examen se describe a continuación:<sup>67</sup>

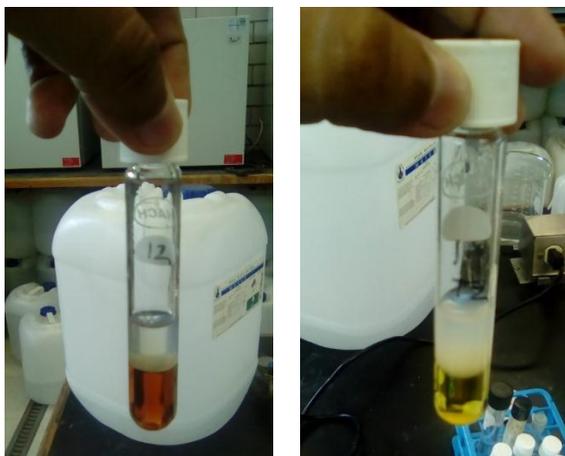
- 1.- Con un marcador se enumeró cada vial a emplear para poder identificar su contenido.
- 2.- Se pipeteó 2.00 mL de agua muestra dentro de cada vial usado. Dependiendo de cada caso, se utilizó un frasco con reactivo tipo HR o LR.

---

<sup>65</sup> Estos viales se encuentran aprobados por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA) además de la EPA.

<sup>66</sup> Esto se debió a que los viales rango HR están hechos para procesar muestras de agua donde existen mayores cantidades de materia orgánica que las presentes en las que se pueden procesar con los viales LR.

<sup>67</sup> El procedimiento realizado se ejecutó en base a lo referido por el fabricante HACH en su página web ([www.hach.com](http://www.hach.com)) con respecto a la manera de emplear el producto referido.



**Figura 26.-** Viales de DQO con el agua muestra en su interior. A la derecha el tipo HR y a la izquierda el LR, se puede apreciar una diferencia de color en ambos viales. Fotografías de realización propia.

3.- Cada vial se agitó con un agitador vórtex para garantizar un mezclado uniforme y rápido, evitándose así riesgos causados por el sobrecalentamiento del frasco.

4.- Posterior a la agitación, los viales se introdujeron en un Bloque de un Termo-reactor Digital, modelo DRB200, precalentado a 150 °C. El aparato mantuvo a los tubos a esa temperatura de manera uniforme por 2 horas.



**Figura 27.-** Agitación de un vial tipo HR. Fotografía de realización propia.

5.- Transcurrido el tiempo de espera, los tubos permanecieron dentro del reactor hasta que la temperatura general del mismo disminuyó hasta 120 °C. Después, cada frasco se sacó, se giró 180° y se colocó dentro de una rejilla de plástico.

6.- Se trasladó la rejilla con viales bajo un ventilador hasta que estos alcanzaron la temperatura ambiente.



**Figura 28.-** Reactor calentando los tubos de reactivo para DBO. Fotografía de elaboración propia.

7.- Para determinar la cantidad de materia orgánica presente en las muestras, se empleó un colorímetro previamente calibrado y equipado con un adaptador para leer tubos. Antes de leer las muestras, se insertó y registró el vial BLANCO. Esta primera lectura le servía como referencia al aparato para establecer las cantidades de materia orgánica presentes en las muestras, basadas en las diferentes absorbancias que mostraban los tubos. El blanco se preparó agregando 2 mL de agua destilada a un vial del mismo tipo (HR o LR) del empleado en las muestras que se deseaba leer.

8.- Se realizó la lectura de cada muestra, para ello al aparato se le introdujeron los programas 16 y 17 respectivamente, para programarlo y usar 420 nm como longitud de onda para la lectura de los viales rango LR o 610 nm para la lectura de los viales HR (Hach Company/Hach Lange GmbH, 2014).

9.- Las mediciones realizadas por el colorímetro se registraron en la bitácora y se utilizaron como base para establecer los resultados del estudio, así como las conclusiones finales.

#### 4.1.4.2.- Nitrógeno total, Nitratos y Nitritos

Con respecto a este elemento químico, el Centro de Información y Comunicación Ambiental de Norte América, A.C. (CICEANA) (2002) afirma que:

El Nitrógeno es el compuesto químico más abundante en la atmósfera de nuestro planeta, sin embargo, es tan estable *que para* que los organismos lo asimilen [...] primero necesitan desdoblarlo. *Sin embargo, los seres vivos* lo emplean en la síntesis [...] *de varias* moléculas fundamentales para su metabolismo y *por ello* la importancia en la vida *de estos*.<sup>68</sup> (pág. 1)

La forma en la que los seres vivos obtienen el suministro necesario de este elemento es a través del ciclo del nitrógeno. En este, con base en una serie de procesos biológicos y abióticos, este elemento se transforma en otros compuestos como lo son el amoniacal, el nitrito o el nitrato. Por otro lado, el investigador Agustín Lahora (2003) afirmó que “en el caso de los humedales artificiales, la reducción del Nitrógeno en la aguas tratadas, se da en mayor porcentaje en aquellos que cuentan con poca profundidad (0.3 m)”. (pág. 105)

Para este trabajo, se empleó el nitrógeno total (mg/L), el cual puede definirse como la suma de los valores de nitrógeno amoniacal, nitritos y nitratos en el agua,<sup>69</sup> no incluyéndose el gas

<sup>68</sup> Las letras cursivas son aportación personal.

<sup>69</sup> Todos estos componentes individuales también deben a su vez, estar expresados en mg/L

nitrógeno disuelto ni el nitrógeno orgánico (Sistema de Información del Medio Ambiente, 2007). A continuación se describen los procedimientos utilizados para la determinación de estos valores.

*A) Nitrógeno amoniacal.*

Se le conoce con este nombre al nitrógeno combinado en forma de amoniaco ( $\text{NH}_3$ ) o amonio ( $\text{NH}_4$ ), los cuales son gases que se producen de forma natural por fermentaciones, como por ejemplo en la descomposición de proteínas (CICEANA, 2002). También se debe considerar que este es el primer compuesto en el que se transforma el nitrógeno dentro de su ciclo.

El vial que se empleó en esta prueba fue el Amoníaco TNTplus, HR, de la marca HACH, conformado por un vial con tapa rosa, cuyo reactivo se torna de color verde ante la presencia del amoniaco. Es identificado por la misma compañía con el número 832 y detecta un intervalo de 2 – 47 mg/L  $\text{NH}_3\text{-N}$  (Hach Company, 2010). El procedimiento para realizar la prueba fue el siguiente:<sup>70</sup>

1.- Se pipeteó dentro del tubo con reactivo, 0.20 mL de agua muestra.

2.- Los viales tienen un doble compartimiento en la tapa: el que se utilizó para sellarlo desde fábrica y otro cubierto con un precinto de papel aluminio. En este se encontraba el catalizador para la reacción. Se quitó el precito y luego se cerró el tubo cuidando que el catalizador apuntara hacia el reactivo.

3.- La mezcla se homogeneizó agitándola tres veces.

4.- El vial se dejó reposar dentro de una rejilla de plástico durante 15 minutos.

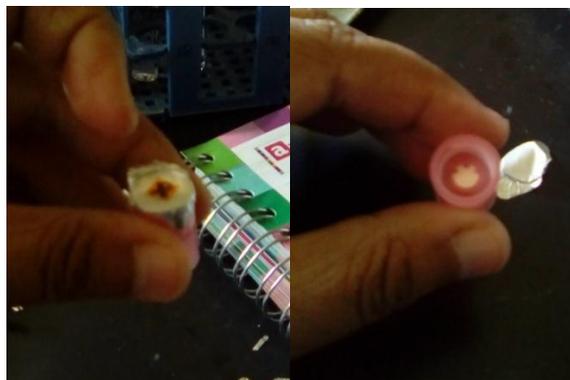
5.- Pasado el tiempo de espera, el frasco se giró tres veces a  $180^\circ$ .

6.- Previo a realizar la medición, el vial se limpió con un pañuelo para eliminar cualquier suciedad que se hubiera adherido al vidrio durante el proceso de preparación de la muestra.



**Figura 29.- Colocación de agua muestra dentro de los viales con reactivo.**  
Fotografía de realización propia.

<sup>70</sup> El procedimiento realizado se ejecutó en base a lo referido por el fabricante HACH en su página web ([www.hach.com](http://www.hach.com)) con respecto a la manera de emplear el producto referido.



**Figura 30.- Segundo compartimiento en la tapa del vial y su contenido.** Fotografía de realización propia.

5.- Pasado el tiempo de espera, el frasco se giró tres veces a  $180^\circ$

6.- Previo a realizar la medición, el vial se limpió con un paño de algodón para eliminar cualquier suciedad que se hubiera adherido al vidrio durante el proceso de preparación de la muestra.

7.- El tubo se introdujo en el espectrofotómetro, el cual empleó 694 nm como longitud de onda para establecer, a través de la absorbancia, la cantidad de nitrógeno amoniacal presente en cada uno (Hach Company, 2010). Cabe mencionar que entre mayor fuera la concentración de amoníaco presente en la muestra analizada, mayor es la intensidad del color en el vial.



Antes



Después

**Figura 31.- Comparativa visual de los colores del vial antes y después de ser usado.** El tono verde es más concentrado entre mayor sea la cantidad de amoníaco presente en el agua muestreada. Fotografía de realización propia.

7.- Las lecturas realizadas se guardaron en la bitácora y se utilizaron como base para generar los resultados y conclusiones finales.

### B) Nitrito.

Es el segundo compuesto soluble en el que se transforma el nitrógeno durante su ciclo y se genera con base en el nitrógeno amoniacal y oxígeno molecular ( $O_2$ ), a través de la oxidación de un compuesto de amonio a nitrito (CICEANA, 2002). Además este compuesto es utilizado para curar carnes.

El vial que se utilizó para esta prueba fue el Nitrito TNTplus, de bajo intervalo, de la marca HACH, el cual está conformado por un vial con una tapa azul. Tiene un intervalo de 0.015 - 0.600 mg/L  $NO_2-N$  y es identificado por la misma compañía con el número 839 (Hach Company/Hach Lange GmbH, 2014). El reactivo de este vial responde a la presencia del nitrito y pasa de un tono transparente a un color muy vivo. El procedimiento para desarrollar la prueba fue el siguiente:<sup>71</sup>



**Figura 32.- Vial Nitrito TNTplus, bajo rango, antes y después de ser usado.** En las imágenes se puede apreciar el color opaco que se genera en el frasco tras la prueba. Fotografías de realización propia.

1.- Usando una pipeta de 10.00 mL y una propipeta, se colocó dentro del vial 2.00 mL de agua muestra.

2.- Los viales contaban con un doble compartimiento en la tapa: el que se utilizó para sellar el reactivo desde fábrica y otro que se encontraba cubierto con un precinto de papel aluminio. En este se encontraba el último reactivo para completar la reacción del vial deseada. Por ello, se quitó el sello y se cerró el frasco cuidando que el reactivo apuntara hacia el interior del vial.

3.- La mezcla se homogeneizó agitándola tres veces.

4.- Se dejó reposar el tubo dentro de una rejilla de plástico durante 10 minutos.

5.- Pasado el tiempo de espera y utilizando un pañuelo, se limpió el frasco con un pañuelo para quitar cualquier suciedad adherida al vidrio de este.

<sup>71</sup> El procedimiento realizado se ejecutó en base a lo referido por el fabricante HACH en su página web ([www.hach.com](http://www.hach.com)) con respecto a la manera de emplear el producto referido.



**Figura 33.- Tapa del vial Nitrito TNTplus, bajo rango, con su doble compartimiento y su contenido.**  
Fotografías de realización propia.



**Figura 34.- Espectrofotómetro realizando las mediciones de los viales Nitrito TNTplus, bajo rango.** Fotografía propia

6.- El dial se colocó dentro de un espectrofotómetro, el cual emplea una longitud de onda de 540 nm (Hach Company/Hach Lange GmbH, 2014).

7.- Se registraron las lecturas obtenidas en la bitácora, utilizándolas como base para generar los resultados y conclusiones finales sobre este estudio.

### C) Nitrato.

El Nitrato es el tercer compuesto soluble en el que se transforma el nitrógeno en su ciclo. Nace como resultado de la oxidación de los nitritos por parte de la bacteria Nitrobacter y se suele emplear como fertilizante para las plantas (CICEANA, 2002).

El reactivo empleado para esta prueba fue el Nitrógeno-nitrato NitraVer X, alto intervalo, de la marca HACH, el cual está conformado por un vial de vidrio (A) y una almohadilla de reactivo en polvo (B) por separado. El intervalo de este reactivo es 0.20 – 30.0 mg/L  $\text{NO}_3\text{-N}$  (Hach Company/Hach Lange GmbH, 2015). En esta prueba, ante la presencia del nitrato, el vial pasa de estar transparente a un color opaco con tonalidades amarillas. El procedimiento para desarrollar el examen fue el siguiente:<sup>72</sup>

<sup>72</sup> El procedimiento realizado se ejecutó en base a lo referido por el fabricante HACH en su página web ([www.hach.com](http://www.hach.com)) con respecto a la manera de emplear el producto referido

1.- Se colocó el adaptador para lectura de tubos al colorímetro y luego se le ingresó el programa 57 al aparato para que se use una longitud de onda de 410 nm para la lectura de estos viales (Hach Company/Hach Lange GmbH, 2015).



**Figura 35.- Materiales empleados en la prueba de Nitrato.** Fotografía de realización propia.

2.- El vial de vidrio (A) se abrió y se pipeteó en él 1.00 mL de agua muestra.

3.- Se cerró el frasco y se giró el tubo diez veces para homogeneizar la muestra.

4.- Se procedió a limpiar el exterior del vial con una toalla

5.- Se colocó el frasco en el colorímetro y se tomó la lectura del BLANCO. Esto se hizo sellando tubo con la tapa del colorímetro, para evitar entradas de luz externas, y apretando luego el botón ZERO. Con esto, el aparato toma una primera lectura de referencia, mismo que se utilizó después para determinar de la presencia de nitratos, con base en la comparativa de absorbancia del tubo antes y después de recibir el reactivo en polvo (B).

6.- Se retiró el vial del instrumento y se volvió a abrir.

7.- Con cuidado para evitar pérdidas, se vertió el contenido de la almohadilla de reactivo en polvo (B) en el interior del frasco y se cerró.

8.- Se giró el tubo diez veces para homogeneizar.

9.- El vial se limpió nuevamente para eliminar cualquier impureza que pudiera empañar el vidrio y subsecuentemente, generar un error en la medición.



**Figura 36.- Vertido del NitraVer X Reagent B en el vial con reactivo.** Fotografía de realización propia.



**Figura 37.- Lectura del colorímetro de una muestra del reactivo para detección de Nitrato.** Fotografía de elaboración propia.

10.- Se ingresó el frasco nuevamente en el colorímetro y se tapó colocando la tapa del aparato sobre este.

11.- Presionando los botones TIMER y luego ENTER, se activó en el colorímetro una reacción de cinco minutos en el que se dejó reposar al frasco aun tapado.

12.- Una vez completado el tiempo, se presionó el botón de READ, realizando así la medición final deseada.

13.- El mismo proceso se realizó con cada uno de los viales empleados. Los resultados obtenidos se depositaron en la bitácora para emplearlos después como base de las conclusiones finales del trabajo.

#### 4.1.4.3.- Fósforo Total.

El fósforo, en sus diversas formas químicas, se emplea principalmente como fertilizante o como componente de los detergentes. Este elemento forma la base de gran número de compuestos, siendo uno de los más importantes los fosfatos.

Al respecto de estos compuestos, el investigador Gonzales Verdecia (2014) afirma “[...] son sustancias importantes *que forman* parte en la distribución de la energía [...] por otro lado, la adición de fosfatos por los humanos [...] exceden las concentraciones naturales *y genera que* en las superficiales *se presente* el fenómeno de eutrofización”

Para esta prueba se utilizaron las almohadillas de reactivo en polvo de fosfato PhosVer 3, de la marca HACH. Las cuales tienen un rango de medición de 0.02 - 2.50 mg/L PO<sub>4</sub> y se torna en un color azul proporcional a la cantidad de fosfonato presente en la muestra original (Hach Company/Hach Lange GmbH, 2014).

En esta prueba se emplearon celdas de vidrio, las cuales se identificaron con la clave DR 900 por la marca HACH y que tienen capacidad para hasta 25.00 mL de agua. El procedimiento a desarrollar esta prueba fue el siguiente:<sup>73</sup>

<sup>73</sup> El procedimiento realizado se ejecutó en base a lo referido por el fabricante HACH en su página web ([www.hach.com](http://www.hach.com)) con respecto a la manera de emplear el producto referido.



**Figura 38.- Materiales utilizados en la prueba de determinación de fósforo total.** Fotografía de elaboración propia.

1.- Originalmente, en esta prueba se colocan 10.00 mL de agua muestra dentro del vial, sin embargo, ensayos previos arrojaron que las muestras de agua a procesar<sup>74</sup> contaban con una alta concentración de fósforo, lo que dificultaría las lecturas del colorímetro. Por ello, para esta investigación en particular, la medida de 10.00 mL para la prueba se elaboró pipeteando una proporción de 9.00 mL de agua destilada y 1.00 mL de agua muestra.

2.- El frasco se tapó y limpió con un pañuelo para eliminar cualquier impureza que empañara el vidrio, afectando las mediciones realizadas en él.

3.- El colorímetro se programó con el número 79 a fin de que empleara una longitud de onda de 610 nm para la lectura de estas muestras (Hach Company/Hach Lange GmbH, 2014).

4.- El frasco se colocó dentro del aparato y tras cubrirlo con la tapa de este, se apretó el botón ZERO para establecer el BLANCO de la muestra, es decir, la lectura inicial de referencia para el instrumento.

5.- Se sacó y destapó el vial, así como a uno de los sobres de almohadillas de reactivo en polvo de fosfato PhosVer 3.

6.- El contenido de la almohadilla se vertió con cuidado al interior del frasco, se tapó y se agitó durante 15 segundos para homogeneizar la muestra.



**Figura 39.- Programación de la medida BLANCO en el colorímetro.** Fotografía de realización propia.

<sup>74</sup> Tanto las muestras de alimentación como las de agua ya tratada por los humedales artificiales.



**Figura 40.- Vertido del reactivo en polvo dentro de la almohadilla fosfato PhosVer 3. Fotografía de realización propia.**

9.- Pasado el tiempo de espera se apretó el botón READ del aparato para realizar la lectura de la muestra.

10.- Las lecturas obtenidas se guardaron en la bitácora para usarlas después como base de los resultados y conclusiones finales.

7.- Con un pañuelo, se volvió a limpiar la superficie del frasco.

8.- El vial se volvió a colocar y tapar en el colorímetro, después se presionaron los botones TIMER y ENTER para iniciar un cronometro de dos minutos en el instrumento.



**Figura 41.- Comparativa visual de los colores del agua muestreada antes y después de aplicado el reactivo fosfato PhosVer 3. Fotografía de realización propia.**

#### 4.1.4.4.- Medición de Ion Sulfato en el agua.

El sulfato ( $\text{SO}_4$ ) se encuentra en casi todas las aguas naturales. La mayor parte de los compuestos sulfatados se originan a partir de la oxidación de las menas de sulfato o la existencia de residuos industriales. El sulfato es uno de los principales constituyentes disueltos en la lluvia (Lenntech, 2016).

El fundamento de esta prueba se explica por la Norma Mexicana NMX-AA-074-SCFI-2014 (2015) de la siguiente manera:

El ion sulfato precipita con cloruro de bario, en medio ácido, formando cristales de sulfato de bario de tamaño uniforme. La concentración de masa del ion sulfato se mide por comparación de la lectura con una curva de calibración analítica. (pág. 1-2)

El reactivo empleado para realizar esta prueba fueron las almohadillas de reactivo en polvo de sulfato SulfaVer 4, de la marca HACH. Los cuales tienen un intervalo de medición de 0.00 a 70.00  $\text{mg/L SO}_4^{2-}$  y se torna en un color opaco proporcional a la cantidad de sulfatos presentes en la muestra original (Hach Company/Hach Lange GmbH, 2014).

Para la realización de esta prueba, se emplearon celdas de vidrio identificadas con la clave DR 900 por HACH, con capacidad para hasta 25.00 mL de agua y el procedimiento realizado fue el siguiente:<sup>75</sup>



**Figura 42.- Herramientas y materiales empleados en la prueba de determinación de Sulfatos totales.**  
Fotografía de realización propia.

- 1.- En este examen se colocan 10.00 mL de agua de muestra dentro del vial, sin embargo, ensayos previos arrojaron que todas las muestras de agua tomadas en los módulos, contaban con una muy alta concentración de sulfatos, dificultando así las lecturas. Por ello, la medida de 10.00 mL necesaria para la prueba, se elaboró pipeteando una proporción de 9.00 mL de agua destilada y 1.00 mL de agua muestra.
- 2.- El frasco se tapó y limpió con un pañuelo a fin de eliminar cualquier impureza que pudiera empañar el vidrio, afectando las lecturas.
- 3.- El colorímetro se programó con el número 91 a fin de que el instrumento empleara una longitud de onda de 520 nm para la lectura de estas muestras (Hach Company/Hach Lange GmbH, 2014).
- 4.- El frasco se colocó dentro del aparato y se cubrió con su tapa, luego se apretó el botón ZERO para establecer el BLANCO, el cual es la lectura inicial de referencia de la muestra para el instrumento.



**Figura 43.- Pipeteo de la muestra de agua a utilizar para la prueba de Sulfatos totales.** Fotografía de elaboración propia.

<sup>75</sup> El procedimiento realizado se ejecutó en base a lo referido por el fabricante HACH en su página web ([www.hach.com](http://www.hach.com)) con respecto a la manera de emplear el producto referido.

5.- Se sacó y destapo el vial, así como a uno de los sobres de almohadillas de reactivo en polvo de Sulfato SulfaVer 4.

6.- El contenido de la almohadilla se vertió con cuidado al interior del vial, luego se tapó y giró tres veces a 360° para homogeneizar la muestra.



**Figura 44.- Almohadilla SulfaVer 4 con reactivo en polvo y su vertido en el interior del frasco con muestra de agua.** Fotografía de realización propia.

7.- Con un pañuelo, se limpió la superficie del frasco, evitando con ello errores en las lecturas.

8.- El vial se volvió a colocar y tapar dentro del colorímetro. Luego se presionó los botones TIMER y ENTER para iniciar un cronometro de cinco minutos en el instrumento.

9.- Pasado el tiempo de espera, se apretó el botón READ para realizar la lectura de la muestra.

10.- Las lecturas obtenidas se guardaron en la bitácora para emplearlas después como base de los resultados y conclusiones finales.



**Figura 45.- Comparativa visual de los colores de las muestras de agua antes y después de la prueba para determinación de Sulfatos.**

Fotografía de realización propia.

#### 4.1.4.5.- Sólidos Suspendidos Totales (SST) Volátiles (SSV) y Fijos (SSF)

La importancia de la determinación de este parámetro es que los SST pueden generar sedimentación y azolvamientos en cuerpos receptores. Además, la cantidad de sólidos totales influye directamente en la cantidad de lodo que se produce dentro del sistema de tratamiento. (Molina y Trigueroz Gutierrez , 2005, pág. 35)

Según la Norma Mexicana NMX-AA-034-SCFI-2001, los Sólidos Suspendidos Totales y Sólidos Suspendidos Volátiles se pueden definir de la siguiente manera:

*Los SST son la suma de los sólidos constituidos sólidos sedimentables, Sólidos fijos y materia orgánica en suspensión y/o coloidal que son retenidas por un elemento filtrante. Por otro lado, los SSV son la cantidad de sólidos suspendidos capaz de volatilizarse por el efecto de la calcinación al ser expuestos a una temperatura de  $550\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 50\text{ }^{\circ}\text{C}$  en un tiempo de 15 a 20 min.<sup>76</sup> (p. 3)*

Cabe mencionar que “la concentración de SSV se suelen considerar como una medida aproximada del contenido de materia orgánica en una muestra” (Metcalf & Eddy, Burton L., Tchobanogluos , & Stensel , 2003, pág. 19) Por último, el residuo de la calcinación se conoce como sólidos fijos y constituyen la porción inorgánica o mineral de los sólidos. (Molina y Trigueroz Gutierrez, 2005)

Con respecto a las capacidades de remoción de Sólidos en suspensión de los humedales artificiales, el investigador Agustín Lahora (2003) afirma que estos “[...] son eliminados en los primeros 5 metros desde la entrada [...] degradándolos hasta convertirlos en productos gaseosos [...] y tardando un día en alcanzar el máximo rendimiento, independientemente de la relación de aspecto Largo-ancho del mismo.” (pág. 104)

Para determinar la cantidad de Sólidos suspendidos totales, se emplearon dos métodos: por evaporación y por microfibras filtrantes, cada uno se describirá por separado y a detalle a continuación.

Una vez que se obtuvieron los resultados completos de ambos procedimientos, se realizó el cálculo de los SST, SSV y SSF presentes en cada una de las muestras de agua que se estudiaron. Esto se realizó empleando las ecuaciones mostradas en la Norma Mexicana NMX-AA-034-SCFI-2001, mismas que se pueden apreciar en el Anexo B de este trabajo.

---

<sup>76</sup> Las palabras en cursiva son agregado personal.

### A) *Determinación de SST por evaporación.*

Según la Norma Mexicana NMX-AA-034-SCFI-2001, el principio de esta prueba es:

La medición cuantitativa de los sólidos y sales disueltas, así como la cantidad de materia orgánica contenida en aguas naturales y residuales, mediante la evaporación y calcinación de la muestra filtrada o no, en su caso, a temperaturas específicas, en donde los residuos son pesados y sirven de base para el cálculo del contenido de estos. (pág. 1)

Ahora bien, el método con el que se realizó esta prueba se dividió en tres etapas: Determinación del peso constante, procedimiento de evaporación y el procedimiento de calcinación.

#### *Determinación del peso constante.*

El peso constante es el peso que se registra cuando el material ha sido calentado, enfriado y pesado, y que en dos ciclos completos las pesadas no presentan una diferencia significativa (NMX-AA-034-SCFI-2001, 2002), es por esto que en el caso de esta investigación, en donde se emplearon cápsulas de porcelana para llevar a cabo esta prueba, esta primera etapa consistió en determinar el peso constante de las mismas. Para toda la prueba se buscó seguir el procedimiento indicado por la misma Norma Mexicana ya citada:



**Figura 46.- Cápsulas de porcelana a emplear en la prueba de evaporación.** Fotografía de realización propia.

- 1.- Utilizando un lápiz, se numeró cada capsula para poder identificarlas y a su contenido. Después de esto, se evitó cualquier contacto directo con los recipientes, todos los traslados de un aparato a otro, se realizaron utilizando pinzas metálicas y guantes térmicos.
- 2.- Las cápsulas se colocaron dentro de una estufa eléctrica con vacío durante un período de 20 minutos, en donde se mantenían a una temperatura constante de 100°C



**Figura 47.- Estufa de vacío con las cápsulas en su interior.** Fotografía de realización propia.



**Figura 48.- Pesado de las cápsulas en báscula analítica digital.** Fotografía propia.

3.- Después los recipientes se ingresaron a una mufla eléctrica que se encontraba a 540 °C, donde permanecieron 15 minutos.

4.- Tras la mufla se regresan las cápsulas a la estufa de vacío por 30 minutos.

5.- Se les colocaba dentro de un desecador para evitar que escapara la humedad de las mismas. Aquí los recipientes reposaban al menos durante dos horas o hasta alcanzar la temperatura ambiente.

6.- Cuando las cápsulas terminaron de enfriarse, se pesaron de una por una en una balanza de presión digital, la cual realizó lecturas con números enteros y cuatro decimales.

7.- Los pesos de cada capsula se recogieron dentro de la bitácora para futuras comparaciones.

8.- A los recipientes se les repitió el proceso desde el paso 2 hasta el 7. Esto se realizó hasta que los resultados arrojados por las mediciones de dos ciclos consecutivos con respecto al peso de las cápsulas, únicamente mostraron variación en el cuarto y último decimal.

Cuando se lograba lo descrito en el paso ocho, se consideraba que ya se había determinado el “peso constante” de las cápsulas, empleándose como tal los pesos obtenidos en el último ciclo realizado. Con esto ya se podía pasar a la siguiente etapa de la prueba.

### *Procedimiento de evaporación.*

- 1.- Las cápsulas se colocaron sobre una parrilla eléctrica de calentamiento.
- 2.- El agua muestra se sacó de refrigeración y se utilizó cuando se encontró a temperatura ambiente. También se agitó previo a usarla para garantizar la homogeneización de la misma.
- 3.- A cada recipiente se le pipetearon 2/3 de su altura (entre 15.00 y 20.00 mL) con el agua muestra correspondiente al número de cada una.
- 4.- La parrilla se prendió y se procuró tener las cápsulas a una temperatura constante (entre 100 y 105 °C) hasta que el agua se evaporó en su totalidad, dejando en ellas solo los residuos a considerar para cálculos posteriores.
- 5.- Las cápsulas se trasladaban al interior de un desecador, dejándolas reposar mientras alcanzaban una temperatura ambiente.
- 6.- Cuando los recipientes se encontraban a temperatura ambiente, se pesaban utilizando una báscula analítica digital a fin de determinar los nuevos pesos de estas. Con esto se finalizaba esta etapa y se podía pasar a la tercera y última.



**Figura 49.- Calentamiento en la parrilla eléctrica de las cápsulas con agua muestra.**  
Fotografía de realización propia.



**Figura 50.- Cápsulas dentro del desecador.**  
Fotografía de realización propia.

### *Procedimiento de Calcinación.*

- 1.- Una vez establecido el peso de las cápsulas con Sólidos Suspendidos Totales, estas se ingresaron a la estufa eléctrica con vacío durante un período de 20 minutos.
- 2.- Los recipientes se colocaron dentro de una mufla eléctrica, la cual se encontraba a 540 °C, donde permanecieron de 15 a 20 minutos.
- 3.- Tras la mufla, se regresaron a la estufa de vacío por 30 minutos para mantenerlas una temperatura constante de 100°C.



**Figura 51.- Cápsulas dentro de la mufla eléctrica.**  
Fotografía de realización propia.



**Figura 52.- Cápsulas de porcelana tras el proceso de calcinado, su interior se aprecia de tono gris.** Fotografía de elaboración propia.

4.- Se colocan las cápsulas en el desecador. Los recipientes se dejaron reposar al menos durante dos horas o hasta alcanzar la temperatura ambiente.

5.- Cuando estaban listas, se pesaron por última vez a fin de determinar el peso tras la calcinación. Esto era el dato final necesario para llevar a cabo el cálculo de los SST, SSV y SSF presentes en las muestras.

### *B) Determinación de SST con Microfibras filtrantes.*



**Figura 53.- Materiales y Equipo utilizado en la prueba con microfibras filtradoras.**  
Fotografía propia.

En esta prueba también se buscó aplicar el procedimiento indicado por la Norma Mexicana NMX-AA-034-SCFI-2001, dado que esta norma aplica directamente a lo realizado en este experimento. En esta se emplearon Crisoles de Porcelana Gooch así como la microfibra filtrante 934-AH de la marca Whatman el cual tiene un tamaño de poro de retención de 1.5 micras. El procedimiento de esta prueba constó de tres fases: determinación del peso constante, filtrado y determinación de SST en el agua muestra y realización de la prueba de calcinación.

*Determinación del peso constante:*

1.- Con un lápiz, se numeró cada crisol que se empleó para poder identificarlos y a su contenido.

2.-Se colocó una lámina de microfibras Whattman en el fondo de cada recipiente, cuidando que la cara con un patrón de rejilla, quedara al descubierto. Después de este paso, no se volvió a tener contacto personal con los crisoles. El manejo de estos debió realizarse utilizando pinzas metálicas y guantes térmicos.

3.-A un Matraz Kitasato se le colocó un adaptador de hule para crisoles y se le conectó a una bomba de vacío, empleando una manguera plástica y su tubo de desprendimiento.

4.- Se colocó un crisol Gooch sobre la boca del adaptador del Matraz Kitasato.

5.- Se lavó el filtro dentro del crisol. Esto se hizo encendiendo la bomba de vacío y haciendo pasar por el crisol y la microfibras de 40.00 a 50.00 mL de agua destilada. El uso de la bomba generó en el interior del matraz, la fuerza de succión necesaria para lograr este efecto.

6.- Habiéndose filtrado el agua destilada, el crisol se transportó al interior de la estufa con vacío, en la que permaneció por un período de 20 minutos.

7.- Los pasos 4, 5 y 6 se repitieron con cada crisol Gooch.

8.- Utilizando una pinza metálica y guantes térmicos, los recipientes se metieron dentro de una mufla eléctrica, con una temperatura interna de 540 °C, por un período de 15 a 20 minutos.

9.- Transcurrido el tiempo, los crisoles fueron sacados de la mufla y vueltos para a poner dentro de la estufa de vacío por 30 minutos.



**Figura 54.- Filtración de agua destilada para el lavado del filtro.** Fotografía propia.



**Figura 55.- Colocación de los crisoles Gooch dentro de la estufa eléctrica.** Fotografía de realización propia.

10.- Los recipientes se colocaron dentro de un desecador para evitar pérdidas de humedad y se les dejaba reposar aquí hasta alcanzar la temperatura ambiente.

11.- Cuando estuvieron listos, se pesó cada uno de los crisoles en una báscula analítica digital y los resultados se registraron en la bitácora.

12.- Se repitió el ciclo conformado por los pasos 6, 8, 9, 10 y 11 en todos los recipientes hasta que la variación de los pesos registrados

entre dos mediciones de ciclos consecutivos, fuera únicamente respecto al cuarto y último decimal mostrado por la báscula analítica. Cuando esto ocurrió, se pudo pasar a la siguiente fase de la prueba.



**Figura 56.- Crisoles Gooch dentro del desecador.** Fotografía de realización propia.

#### *Filtrado y determinación de SST en el agua muestra.*

1.- A un matraz Kitasato se le colocó un adaptador de hule para crisoles en la boca, así como se le conectó a una bomba de vacío a través de su tubo de desprendimiento.

2.- Con unas pinzas, se colocó un crisol Gooch encima de la boca del adaptador.



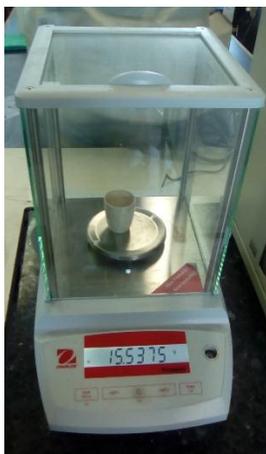
**Figura 57.- Instalación completa de la bomba de vacío, el matraz Kitasato y el adaptador de hule.**  
Fotografía propia.

3.- El agua muestra se sacó de refrigeración. Se empleó cuando estuvo a temperatura ambiente y agitándola previamente para garantizar la homogeneización de la misma.

4.- Se encendió la bomba de vacío. Se pipeteó y filtró a través del crisol, una determinada cantidad de agua muestra.

5.- La cantidad empleada se registró en la bitácora para utilizarla en cálculos posteriores.

6.- Tras la filtración de la muestra, se agregó y filtró dentro del recipiente, de 20.00 a 30.00 mL de agua destilada. Esto para reunir todos los sólidos en el fondo del mismo, sobre la malla filtrante.



**Figura 58.- Pesado de un crisol Gooch en la báscula analítica.**  
Fotografía de realización propia.

7.- Cuando se terminó de filtrar el agua destilada, el crisol se transportó al interior de la estufa eléctrica con vacío, donde permaneció por 30 minutos o hasta que se terminó de secar.

8.- A la salida de la estufa, los recipientes se dejaron reposar dentro de un desecador hasta que alcanzaron la temperatura ambiente.

9.- Los crisoles Gooch se pesaron de manera individual para determinar sus nuevos pesos.

10.- Los resultados se registraron en la bitácora. Con esto se concluyó la segunda fase de la prueba.

#### *Realización de la prueba de calcinación.*

1.- Los recipientes se colocaron dentro de la estufa de vacío por un período de 20 minutos.

2.- Pasado el tiempo, los crisoles se ingresaron dentro de una mufla eléctrica para que permanecieran allí a una temperatura constante de 540 °C de 15 a 20 minutos. Luego se les retornó a la estufa de vacío por 30 minutos.

3.- Por último, para concluir su enfriamiento, los recipientes se colocaron en un desecador por dos horas o hasta que alcanzaran la temperatura ambiente.

4.- Los crisoles Gooch se pesaron por última vez. Sus resultados se guardaron dentro de la bitácora. De esta forma se finalizó el proceso completo de la prueba.



**Figura 59.- Crisoles Gooch dentro de la mufla eléctrica.** Fotografía de realización propia.



**Figura 60.- Imagen de los crisoles tras salir de la mufla eléctrica;** los SST se tornaron en color gris por la calcinación. Fotografía de realización propia.

#### 4.1.4.6.- Determinación del pH

De este factor, los investigadores Delgadillo, Camacho, Pérez y Andrade (2010) afirman: “El pH indica la concentración de iones hidrógeno en una disolución. Se utiliza como medida de la naturaleza ácida o alcalina de una solución acuosa. Muchas propiedades de las sustancias químicas dependen de la concentración del Ion hidrógeno en solución” (pág. 73)

Además, la norma mexicana NMX-AA-008-SCFI-2011 (2012), con respecto a este factor, afirma que: “es el parámetro más importante utilizado en la evaluación de las propiedades corrosivas de un medio ambiente acuático. Asimismo, es importante para el funcionamiento efectivo de los procesos de tratamiento de aguas y su control” (pág. 1)

El valor de pH está comprendido en una escala de 0 a 14, donde el valor medio es 7 y corresponde a soluciones neutras como el agua. Esta relación fue definida en 1909 por Söresense (Buck, y otros, 2002) A continuación se aprecia una tabla donde se establecen los valores aproximados para clasificar esta propiedad en el agua residual

Tabla 14.- Valores aproximados para clasificar el pH en el agua residual				
Ácido		Neutro	Alcalino	
Fuerte	Medio		Medio	Fuerte
0.0 - 4.3	4,3 – 7.0	7.0	7.0 – 8.2	8.2 – 14.00

Fuente: Delgadillo , Camacho, Pérez y Andrade, 2010

Según nos marca la Norma Mexicana NMX-AA-008-SCFI-2011 (2012) “Existen dos métodos para realizar la determinación del pH: el colorimétrico y el electrométrico. [...] Sin

embargo, Los métodos colorimétricos tienen una precisión restringida.” (pág. 1)<sup>77</sup> Por ello, en esta investigación se empleó el segundo método, del cual la misma norma mexicana antes citada afirma:

El método electrométrico se basa en la medición de la fuerza electromotriz de una celda electroquímica, que consta de la muestra, un electrodo de vidrio y un electrodo de referencia. Se puede obtener Una desviación estándar de  $\Delta\text{pH} = 0,05$  o menos. (pág. 2)

Los pasos realizados para la realización de esta prueba fueron los siguientes:<sup>78</sup>

1.- Se conectó el electrodo de vidrio al potenciómetro. Para la realización de la prueba se utilizó un potenciómetro de la marca OAKTON.

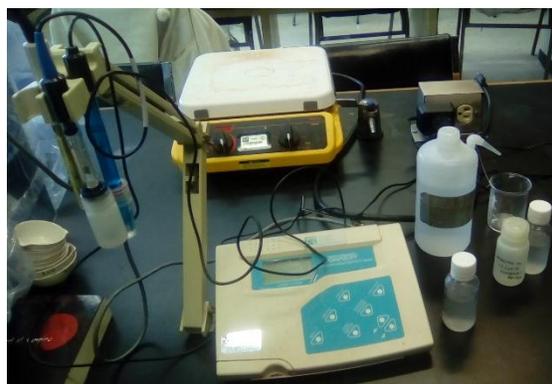
2.- El potenciómetro se conectó a la electricidad y se calibró.<sup>79</sup>

3.- Las muestras a emplear se sacaron de refrigeración. Se utilizaron cuando estuvieron a temperatura ambiente y se agitaron para homogeneizarlas.

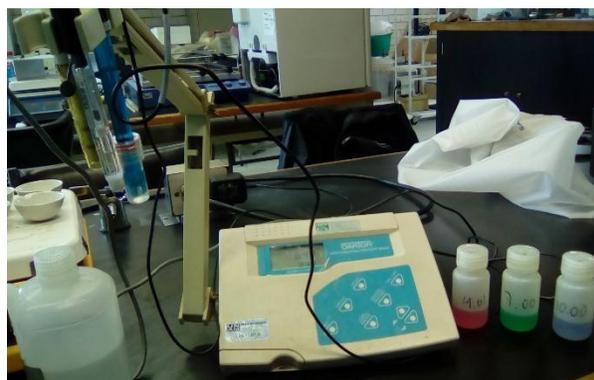
4.- La punta del electrodo de vidrio se sumergió de 1.50 a 2.0 cm. dentro del agua muestra de uno de los frascos. Se cuidó que esta no tuviera contacto ni con el fondo ni con las paredes del bote a fin de evitar errores en la medición.

5.- El electrodo se mantuvo inmóvil en la misma posición, hasta que apareció la palabra “READY” en la pantalla del potenciómetro, indicando con ello la lectura final de la muestra.

6.- La lectura de la muestra se registró dentro la bitácora.



**Figura 61.- Potenciómetro y materiales empleados para la determinación de pH.** Fotografía de elaboración propia.



**Figura 62.- Soluciones empleadas para la calibración del potenciómetro.** Fotografía de elaboración propia.

<sup>77</sup> Esto es una paráfrasis de lo dicho por la norma en esta página.

<sup>78</sup> El procedimiento para la lectura del PH se realizó en base a lo referido por el fabricante OAKTON en su página web (<http://www.4oakton.com>).

<sup>79</sup> Para la calibración del aparato se siguieron las instrucciones del fabricante del equipo, mismas que fueron congruentes con lo marcado por la norma mexicana NMX-AA-008-SCFI-2011 para este mismo fin.



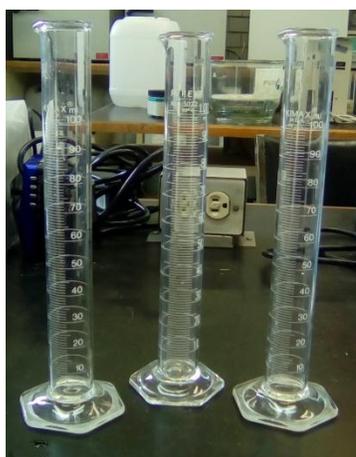
**Figura 63.- Realización de la lectura de pH del agua muestra.** Fotografía de elaboración propia.

7.- Se sacó la punta del electrodo del agua muestra. Posteriormente se lavó utilizando una piseta y agua destilada.

8.- El ciclo conformado por los pasos 4, 5, 6 y 7 se repitió con cada una de las muestras.

#### 4.1.4.7.- Porcentaje de porosidad de los sustratos

La porosidad es el volumen total del medio no ocupado por partículas sólidas, sino solo por agua y se expresa en porcentaje (Rouquerol, y otros, 1994). Cabe mencionar que esta prueba sirvió para entender a fondo el funcionamiento de los tres módulos de humedales artificiales, por lo que la prueba se realizó con los tres sustratos. Para determinar este parámetro se realizaron los siguientes procedimientos y cálculos:



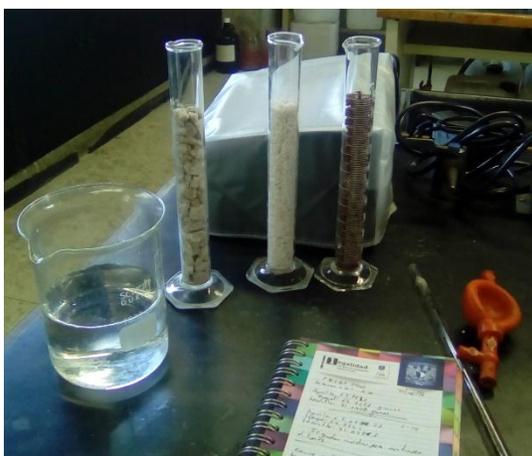
**Figura 64.- Probetas de 100 mL usadas para la prueba de porosidad.** Fotografía de elaboración propia.

1.- Se consiguieron tres probetas idénticas con una capacidad de 100 mL cada una.

2.- A cada probeta se le llenó hasta la marca de los 100 mL con uno de los tres materiales a examinar.

3.- Con ayuda de una pipeta, se le agregó agua destilada a una de las probetas hasta que llegó a su punto de saturación, que en este caso fue hasta que el nivel del agua también alcanzó la marca de los 100 mL de agua de la probeta.

4.- Se repitió el paso tres con las otras dos probetas.



**Figura 65.-** Probetas listas para iniciar el pipeteo de agua destilada. Fotografía de elaboración propia.

5.- Se registró en la bitácora la cantidad de mililitros de agua que se agregó a cada una de las probetas.

6.- El porcentaje de porosidad de los materiales se calculó en base a la siguiente ecuación: (Rouquerol, y otros, 1994, pág. 1744)<sup>80</sup>

$$n = (V_v / V_t) \times 100$$

Donde:

$V_v$  = volumen ocupado por espacios vacíos o cantidad de agua ingresada

$V_t$  = Volumen total de sustrato usado

#### 4.1.4.8.- Porcentaje de humedad en los sustratos

Se entiende por humedad del suelo a la masa de agua contenida por unidad de masa de sólidos (Massol, 2008). La obtención de humedad se realiza por diferencias de peso, por ello, para determinar este factor con respecto a los tres materiales que se emplearon como sustratos en los humedales artificiales, se realizó el siguiente procedimiento:

- 1.- Se consiguieron tres vasos de precipitado idénticos de 80 mL de capacidad.
- 2.- Se pesó cada vaso en una báscula analítica digital. Así se estableció el peso de los recipientes vacíos. Este aparato marcó los resultados con enteros y cuatro decimales.



**Figura 66.-** Vasos de precipitado con los sustratos. Fotografía de realización propia.

<sup>80</sup> A la formula ofrecida en este artículo se le agrego el múltiplo (x 100) a fin de obtener una medición en porcentaje.

3.- Cada recipiente se llenó hasta la marca de 40 mL con uno de los materiales a examinar.

4.- Los vasos se volvieron a pesar, estableciendo el peso inicial del material agregado.

5.- A cada recipiente se le pipeteó agua destilada hasta que esta alcanzó la marca de 40 mL, esto a fin de saturar con agua los sustratos.

6.- Se registró en la bitácora la cantidad de agua que se agregó a cada vaso.

7.- Las recipientes se pesaron nuevamente para establecer el peso del agua ingresada. Los resultados se guardaron en la bitácora

8.- El agua se retiró de manera cuidadosa de cada vaso. Se procuró que no se perdiera ninguna parte de los sustratos contenidos.

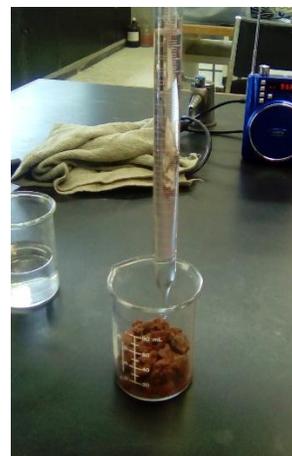
9.- Se volvieron a pesar los recipientes y se registraron los resultados en la bitácora.

10.- Los vasos se ingresaron adentro de la estufa eléctrica con vacío, donde permanecieron de 30 a 40 minutos a una temperatura constante de 100 °C.

11.- Tras sacar los recipientes de la estufa, se colocaban dentro de un desecador por 15 minutos o hasta que alcanzaban la temperatura ambiente.

12.- Los vasos se pesaron y sus resultados se anotaron en la bitácora.

13.- Se repitió el ciclo conformado por los pasos 10, 11 y 12 en los recipientes, hasta que las mediciones de dos ciclos consecutivos mostraron variación únicamente en el último decimal de la báscula. Entonces se consideraba que el vaso y el material habían llegado a su peso constante de secado.



**Figura 67.- Pipeteo de agua destilada en cada vaso de precipitado.**

Fotografía de elaboración propia.



**Figura 68.- Determinación de los pesos de los sustratos secos.**

Fotografía de elaboración propia.

14.- Los pesos constantes de secado se registraron en la bitácora y luego se procedió a realizar el cálculo del porcentaje de humedad del material. Esto se realizó con base en la siguiente fórmula (Massol, 2008):

$$\% = (m-d / m) * 100$$

Donde:

% = porcentaje humedad

m = Masa de sustrato húmedo

d = Masa de sustrato secado en estufa

#### 4.1.4.9.- Cálculo de la velocidad de entrada y salida del agua de los humedales artificiales

La realización de esta prueba fue importante dado que los resultados de esta, sumados a los de otros dos procedimientos (Seguimiento y registro de las cantidades de agua tratada que produjeron los prototipos y Determinación de la cantidad de agua de lluvia diaria y mensual ingresó al sistema), fueron la base para realizar el cálculo del tiempo de retención hidráulico.

Esta prueba consistió en determinar el tiempo que le tomaba al agua tanto entrar como salir de los módulos. Para esto, el procedimiento que se siguió fue el siguiente:



**Figura 69.- Botes de ingreso de agua a los humedales artificiales con el agua de la prueba.**

Fotografía de elaboración propia.

1.- Los botes de entrada y salida de los humedales artificiales se vaciaron. Así mismo se cerraron las válvulas de paso para que el agua no entrara o saliera antes de lo previsto.

2.- Se agregó un litro de agua a cada uno de los botes de entrada a los humedales.

3.- Se abrieron las válvulas de paso, procurando hacerlo prácticamente al mismo tiempo, a fin del recorrido del agua en los tres humedales se iniciara de manera simultánea.

4.- Se registró en la bitácora el minuto en que se abrieron las válvulas, dado que esto marcó el inicio de la prueba.



**Figura 70.- Botes de salida para agua tratada en medio de la prueba de velocidad.** Fotografía de elaboración propia.

5.- Se vigiló atentamente a los prototipos, a fin de poder registrar en la bitácora el minuto en que los botes de ingreso de agua de cada módulo, se vaciaron 500 mL y luego el litro. Así mismo se buscó registrar el minuto en que los botes de salida para el agua tratada, reunieron en su interior medio litro y un litro, respectivamente.

6.- Con los registros de tiempo concluidos, se procedió al cálculo de la velocidad que presento cada uno de los humedales artificiales, lo cual se realizó con base en la siguiente formula:

$$\text{Velocidad} = \text{Distancia} / \text{Tiempo}$$

7.- Los resultados del enunciado anterior, fueron los productos finales de esta prueba.

#### 4.1.4.10.- Cálculo de la precipitación diaria en el área de estudio

Al encontrarse instalados en una azotea, los prototipos de humedales artificiales estuvieron expuestos a diversos factores climáticos. De todos ellos, el que debió tomarse en cuenta para realizar el cálculo del tiempo de retención hidráulico fue la lluvia. Esto fue importante porque se usó como base para calcular la cantidad total de agua de alimentación que tuvieron los módulos a partir de la siguiente formula:

$$\text{Aatd} = \text{Aim} + \text{Ap}$$

Donde:

Aatd = Cantidad de agua de alimentación total diaria

Aim = Cantidad de agua ingresada manualmente

Ap = Cantidad de agua pluvial

Determinar este factor significó definir las cantidades de precipitaciones que se presentan en la Facultad de Estudios Superiores Aragón (lugar en donde se ubicó el prototipo) y ello a su vez, el clima presente en esta área.

Por ello, para realizar esta pesquita se empleó una metodología de investigación climática, basada en los libros de la doctora Enriqueta García: Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen del 2004 y Apuntes de climatología de 1986. Los procedimientos que se realizaron en esta investigación fueron:

1.- Tomando en cuenta la posición geográfica de la FES Aragón (latitud  $19^{\circ}28'29''$ , longitud  $99^{\circ}02'35''$  y altitud 2235), se buscó y determinó la lista de estaciones meteorológicas cuya ubicación mostró características similares a la de la FES, especialmente la altitud.

2.- Se determinó una lista de 10 estaciones meteorológicas. Con ellas se creó una poligonal de trabajo.

3.- Con la poligonal de trabajo sobre un mapa con curvas de nivel a cada 20 metros de altitud y utilizando la ubicación de la FES Aragón como punto focal, se seleccionó a la estación llamada San Juan de Aragón (latitud  $19^{\circ}28'$ , longitud  $99^{\circ}04'$  y altitud 2240) para emplearla para cálculos posteriores.

4.- Utilizando como base la información proporcionada por los muestreos de lluvia y temperatura que realizó la propia estación de San Juan de Aragón, así como las formulas climáticas de la doctora García de Miranda (2004, pág. 50-75 y 1986, pág. 103-116), se calculó el tipo de clima presente en la mencionada estación meteorológica.

5.- Se asumió por similitud que el clima calculado previamente, era el mismo que presente en la Facultad de Estudios superiores Aragón, la formula fue:  $BSIk_w(w)(i')g$

6.- Se tomó el promedio de precipitación mensual registrado por la estación San Juan de Aragón y luego cada uno se dividió entre la cantidad de días que conformó dicho mes. Así se obtuvo la cantidad de milímetros diarios que precipitaron cada mes en el área.

7.- Se transformaron los milímetros diarios de precipitación en milímetros por metros cuadrados, a fin de obtener una medida de área.

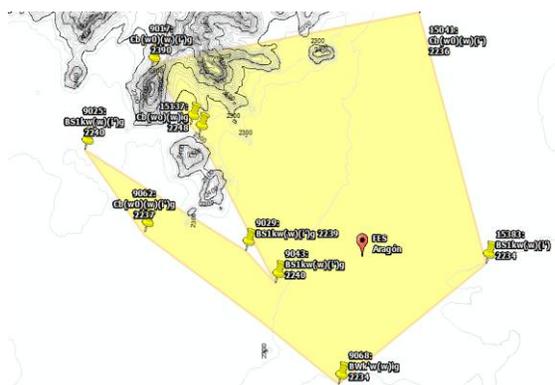


Figura 71.- Poligonal de trabajo referenciada sobre el mapa de curvas de nivel. Plano de elaboración propia.

Tabla 15.- Determinación de la precipitación diaria en FES Aragón												
	Ene.	Feb.	Mar.	Abril	Mayo	Jun.	Jul.	Ago.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.
Precipitación mensual	5.8	11.4	13.2	25.3	42.3	118.3	126.4	111.7	91.6	47.7	10.8	4.8
Cantidad de Lluvia	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31
Precipitación diaria	0.19	0.41	0.43	0.84	1.36	3.94	4.08	3.6	3.05	1.54	0.36	0.15

Tabla de elaboración propia.

8.- Se calculó el área de captación de agua pluvial<sup>81</sup> de los humedales artificiales.

9.- Se obtiene la cantidad de agua pluvial que ingresó en cada módulo, multiplicando el área de captación por los milímetros por metro cuadrado que se presentaron en el área.

10.- La cantidad de agua pluvial ingresó en los humedales artificiales y se sumó a la que se ingresó manualmente a los mismos. Con esto se obtuvo el resultado final del procedimiento.

#### 4.1.4.11.- Registro de litros de agua tratada producidos por los módulos de humedales artificiales.

El último factor que se tomó en cuenta para lograr la determinación del tiempo de retención hidráulico fueron los registros de las cantidades de agua tratada que se produjeron en cada uno de los prototipos. Para esto, los muestreos hechos se guardaron en la bitácora de la investigación y se realizaron con la siguiente metodología.

Tabla 16.- Características Generales de los Muestreos de Agua Tratada producida por los prototipos de humedales artificiales	
Tipo de muestra	Litros de agua tratada
Temporalidad del muestreo	Cada dos días
Número de puntos de muestreo	Tres
Descripción de puntos de muestreo	Se registró en bitácora la cantidad de agua reunida en los botes de salida de agua de los prototipos
Parámetros medidos in situ	Cantidad
Parámetro analizado	Producción

Tabla de elaboración propia.

<sup>81</sup> Refiriéndose a la cara superior de los módulos de humedales artificiales, con medidas de 0.21 x 0.40 metros.

#### 4.1.4.12.- Metodología de muestreos de temperatura

A fin de determinar las diferencias térmicas que generó la instalación de los módulos de humedales artificiales al interior del edificio muestra, se realizaron muestreos de temperatura en diez puntos.

Para su realización se utilizó un termómetro higrómetro digital de la marca ANDOER, el cual contaba con cable y sensor externo. El aparato detectaba en el exterior un rango de temperatura de  $-50^{\circ}\text{C} \sim 90^{\circ}\text{C}$  y un porcentaje de humedad de  $20\% \text{ RH} \sim 90\% \text{ RH}$ <sup>82</sup> y contaba un factor de error de  $2^{\circ}\text{F}$ .



Figura 72.- Termómetro higrómetro empleado en el estudio, registrando la temperatura superficial de la azotea del edificio muestra. Fotografía de elaboración propia.

Tabla 17.- Características Generales de los Muestreos de Temperatura	
Tipo de muestra	Lectura de termómetro higrómetro
Temporalidad del muestreo	Diario
Número de puntos de muestreo	Diez
Descripción de puntos de muestreo	Temperatura de azotea, 3 puntos de muestreo bajo los módulos de fibra de vidrio, 3 puntos de muestreo en el perímetro de los módulos, 3 puntos de muestreo junto al tallo de los alcatraces, a nivel del sustrato.
Parámetros medidos in situ	Temperatura
Parámetro analizado	Diferencias térmicas

Tabla de elaboración propia

Con los diez puntos de muestreo se realizaron tres tipos de comparaciones:

- a) **La temperatura de las periferias de los humedales artificiales con respecto a las del tallo de los alcatraces:** Los laterales de los módulos de fibra de vidrio, sufrieron ganancia

<sup>82</sup> Los datos generales del aparato se tomaron del manual de usuario proporcionado por el fabricante.

térmica debido a la radiación del sol. Para evitar una completa transmisión de este calor hacia los humedales, se ocuparon recipientes dobles (maceta A y B) a fin de disminuir los efectos de este fenómeno. Por ello era necesario determinar si se presentaron diferencias térmicas entre estos dos puntos y de presentarse, cuantificarlas.



**Figura 73.-** Lectura con el termómetro en la orilla de uno de los módulos de humedal artificial. Fotografía de elaboración propia.

b) *Las mediciones en el tallo de los alcatraces con respecto a las de la azotea:* Al realizar esta comparativa se precisó si la temperatura superficial que se presentó en los humedales artificiales era similar a la del suelo de la azotea. Con ello se buscó determinar si alguno de los tres sustratos, mostró particulares capacidades para reflejar o absorber el calor.

c) *La temperatura bajo los humedales artificiales con respecto a la de la azotea:* Con esta se lograba el punto central de esta prueba, determinar y cuantificar si existió o no una diferencia térmica al interior del edificio a causa de la instalación de este sistema.



**Figura 74.-** Determinación con el termómetro de la temperatura en el tallo del alcatraz. Fotografía de elaboración propia.

#### *4.1.4.13.- Cálculo de relación peso-utilidad de los sustratos empleados*

Para definir la cantidad de módulos de humedales artificiales que puede soportar la azotea del edificio muestra, se realizaron los siguientes procedimientos.

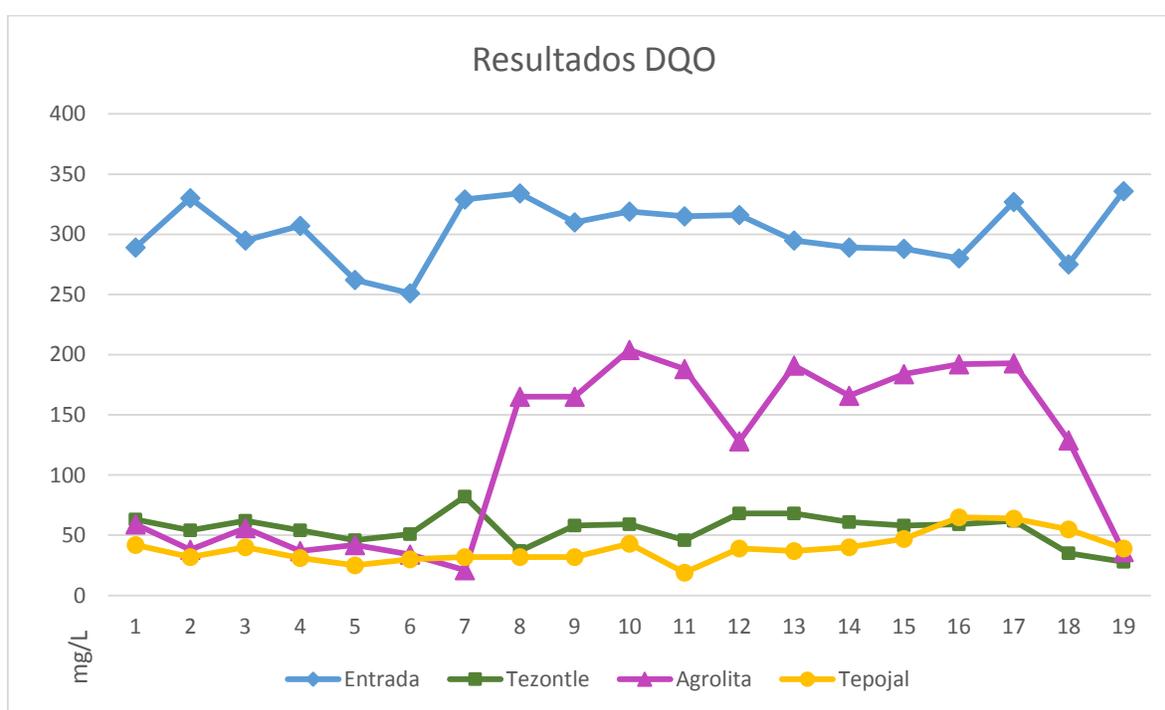
- 1.- Se calculó el área de los módulos.
- 2.- Considerando el área de los humedales artificiales y el peso granulométrico de los materiales, se dedujo el peso aproximado de cada uno, estando seco y saturado de agua.
- 3.- Utilizando una referencia numérica, se realizó una comparativa para determinar el número de módulos que podrían colocarse en una azotea.
- 4.- En base a la cantidad de módulos de humedales artificiales, se calculó la cantidad de agua que podría tratarse.

## 4.2. Resultados de las pruebas.

Los siguientes son las representaciones gráficas de los resultados obtenidos tras haber realizado y concluido todas las pruebas que se realizaron sobre los módulos de humedales artificiales, así como a las muestras de agua tomadas de ellos.

### 4.2.1.- Demanda Química de Oxígeno (DQO)

El siguiente gráfico se elaboró con base en los productos obtenidos de la prueba realizada para cuantificar la cantidad presente de este contaminante en las muestras tomadas de los prototipos. La tabla con la relación de los resultados numéricos se puede apreciar en el anexo C.



**Figura 75.- Comparativa entre la valores de DQO presentes en el agua antes y después de ser tratada por los humedales artificiales. Gráfico de elaboración propia.**

Los resultados demostraron que la materia orgánica que se introdujo a los módulos de humedales artificiales disminuyó en más de un 50%, siendo los siguientes los porcentajes exactos de reducción:

**Tezontle: 80.92%**

**Agrolita o perlita: 62.88%**

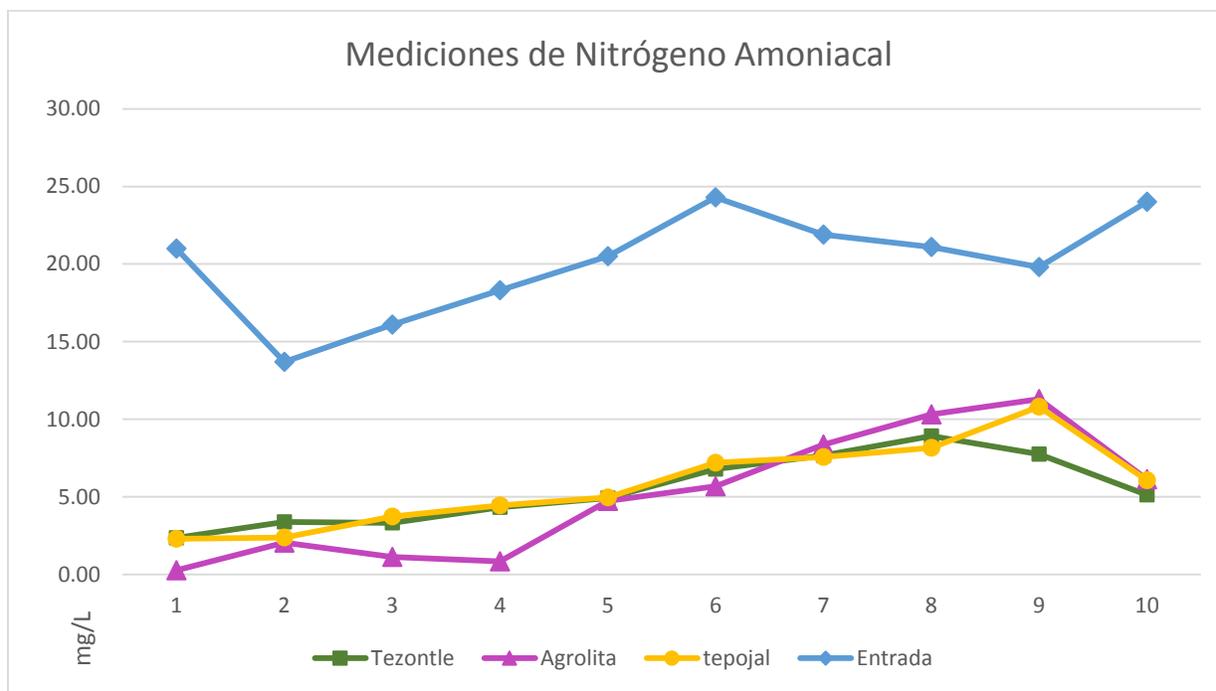
**Tepojal: 86.96 %**

Se apreció que el sustrato que tuvo una mayor capacidad de remoción fue el tepojal. Por otro lado, la agrolita después de un período de tiempo, redujo sus capacidades de tratamiento; los motivos de ello se analizaron en el apartado de discusión.

#### 4.2.2.- Nitrógeno total, Nitratos y Nitritos

Para poder estudiar a detalle la información mostrada en este subcapítulo, los resultados numéricos obtenidos durante la determinación de las cantidades presentes en el agua muestra de nitrógeno amoniacal, nitrito, nitrato y nitrógeno total, se puede apreciar en el anexo C.

##### 4.2.2.1.- Nitrógeno amoniacal.



**Figura 76.- Comparativa de las cantidades de nitrógeno amoniacal presente en el agua antes y después de ser tratada por los humedales artificiales.** Gráfico de elaboración propia.

Con base en los resultados obtenidos en esta prueba se realizó la anterior gráfica. Los índices de remoción de DQO de cada sustrato se aprecian a continuación, pudiéndose apreciar que el de mayor eficacia fue la agrolita, sin embargo, los tres mostraron porcentajes similares.

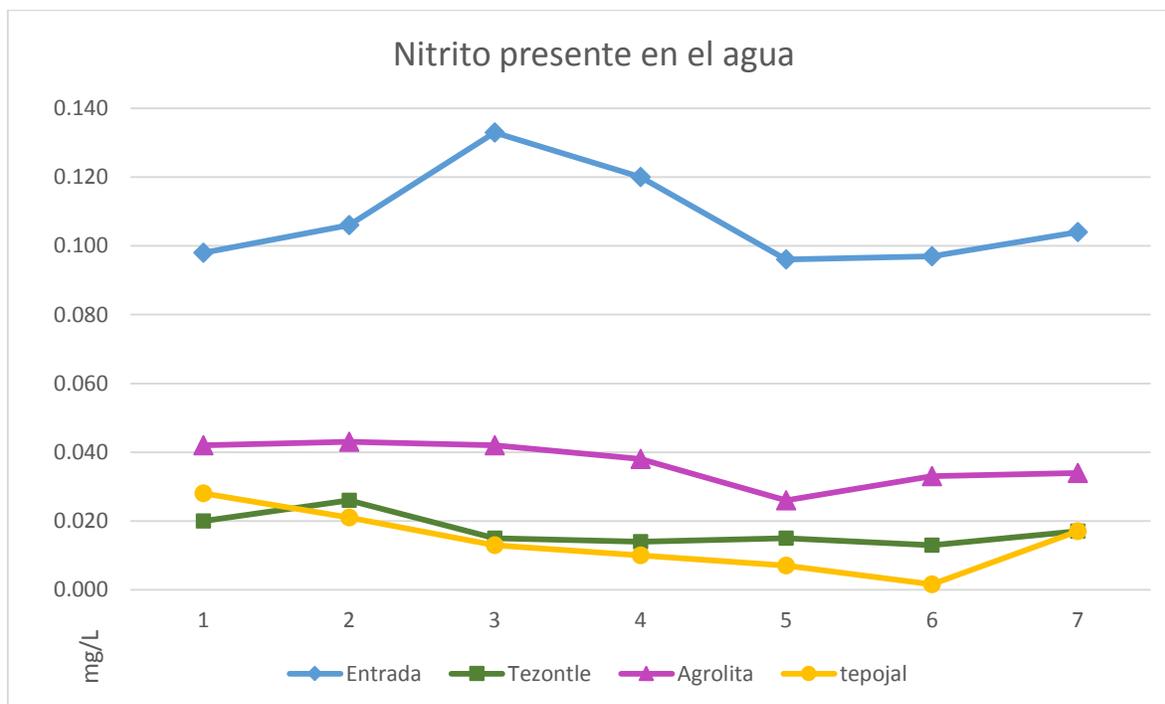
**Tezontle: 72.84%**

**Agrolita o perlita: 74.72%**

**Tepojal: 71.32 %**

#### 4.2.2.2.- Nitrito.

El siguiente gráfico muestra los resultados obtenidos en cuanto a la remoción de nitrito que se presentó dentro del agua una vez tratada por los humedales artificiales.



**Figura 77.- Comparativa de las cantidades de Nitrito presentes en el agua antes y tras recibir el tratamiento de los humedales artificiales. Gráfico de realización propia.**

Con lo anterior se pudo apreciar que el sustrato que produjo una mayor reducción del contaminante fue el tepojal y los porcentajes exactos de remoción que presentó cada material fue el siguiente:

**Tezontle: 84.04%**

**Agrolita o perlita: 65.78%**

**Tepojal: 87.06 %**

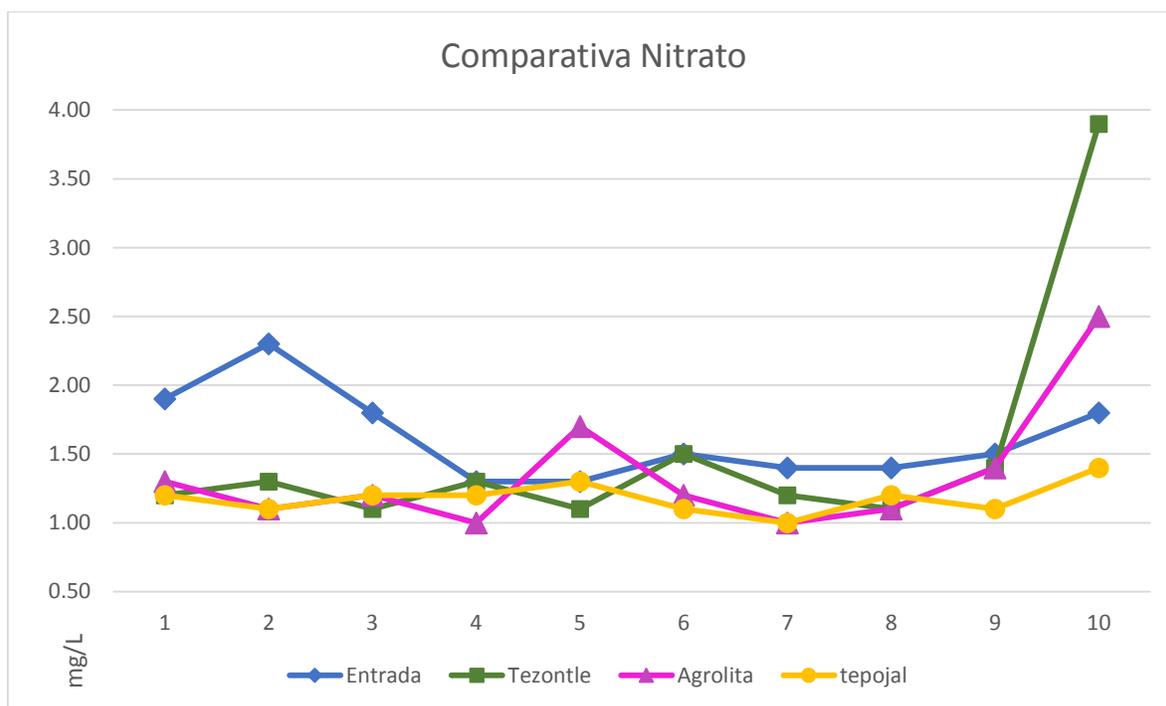
#### 4.2.2.3.- Nitrato.

Con respecto a este contaminante, tal y como se puede apreciar en el siguiente gráfico, el porcentaje de Nitrato que fue removido del agua por parte de los humedales artificiales, fue menor a los mostrados en anteriores contaminantes. El motivo de ello se exploró en el apartado de discusión. Los índices de remoción presentados en cada uno de los módulos fue el siguiente:

**Tezontle: 6.79%**

**Agrolita o perlita: 16.67%**

**Tepojal: 27.16 %**



**Figura 78.-** Cantidades de nitrato presentes en el agua antes y después de recibir el tratamiento de los humedales artificiales. Gráfico de realización propia.

#### 4.2.2.4.- Nitrógeno total.

Este factor se realiza sumando los resultados de los ya mencionados, compuestos orgánicos derivados del nitrógeno: nitrito, nitrato y nitrógeno amoniacal. El porcentaje de remoción de este contaminante que se presentó en el agua, fueron son los siguientes:

**Tezontle: 71.94%**

**Agrolita o perlita: 78.53%**

**Tepojal: 72.48 %**

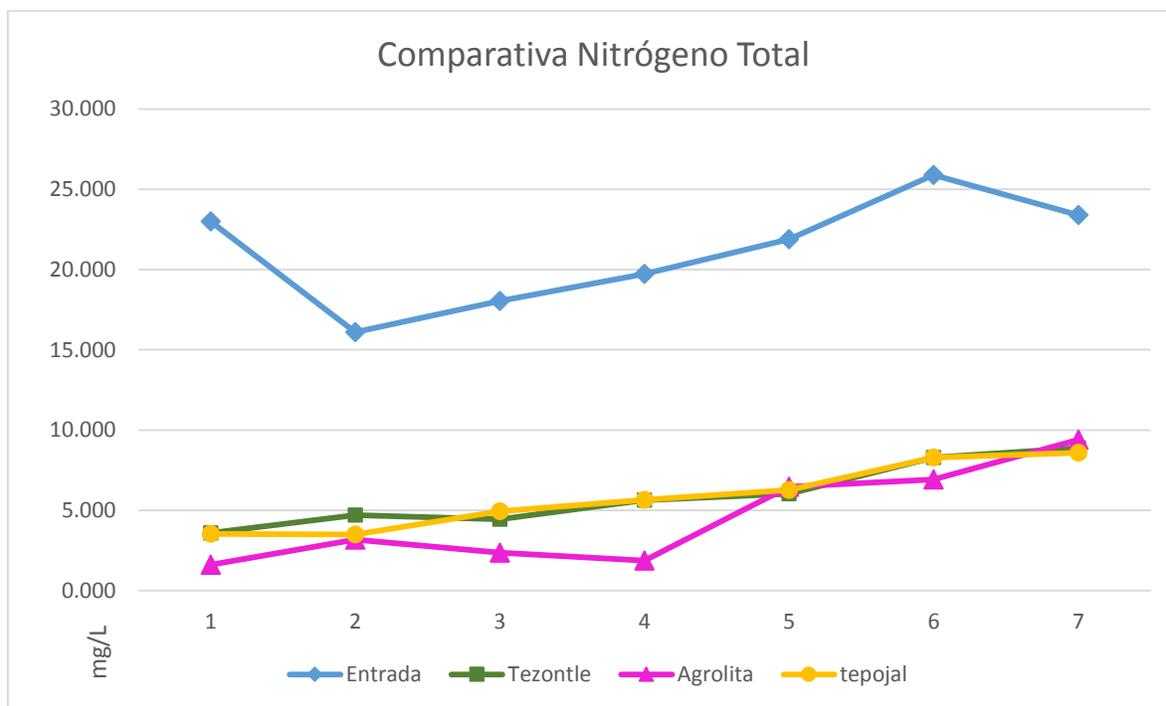


Figura 79.- Resultados de la determinación del Nitrógeno total presente en las muestras de agua. Gráfico de elaboración propia.

#### 4.2.3.- Fósforo total y fosfatos.

Con la realización de la prueba para la determinación de la cantidad de Fósforo total, se obtuvo también la cuantificación de los fosfatos presentes en el agua analizada. Los resultados numéricos obtenidos en esta prueba se muestran a detalle en el Anexo E, siendo los porcentajes de reducción del fósforo total los siguientes:

**Tezontle: 5.23%**

**Agrolita o perlita: 1.65%**

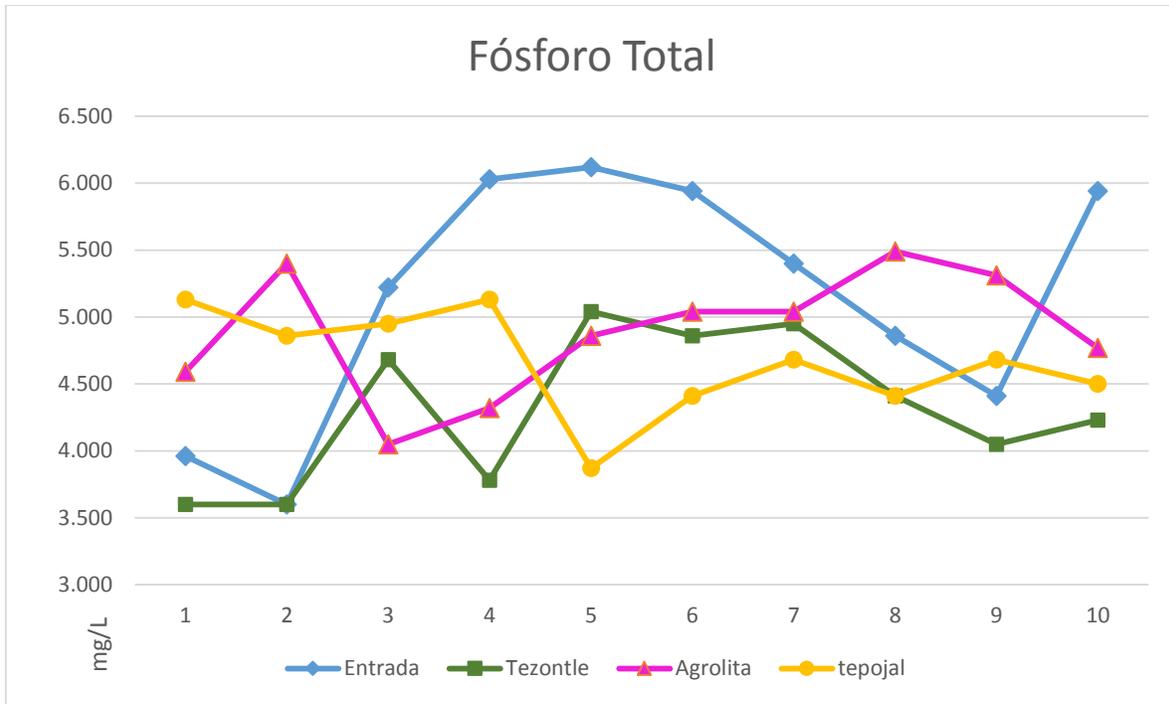
**Tepojal: 3.07 %**

Y con respecto a los fosfatos cuantificados:

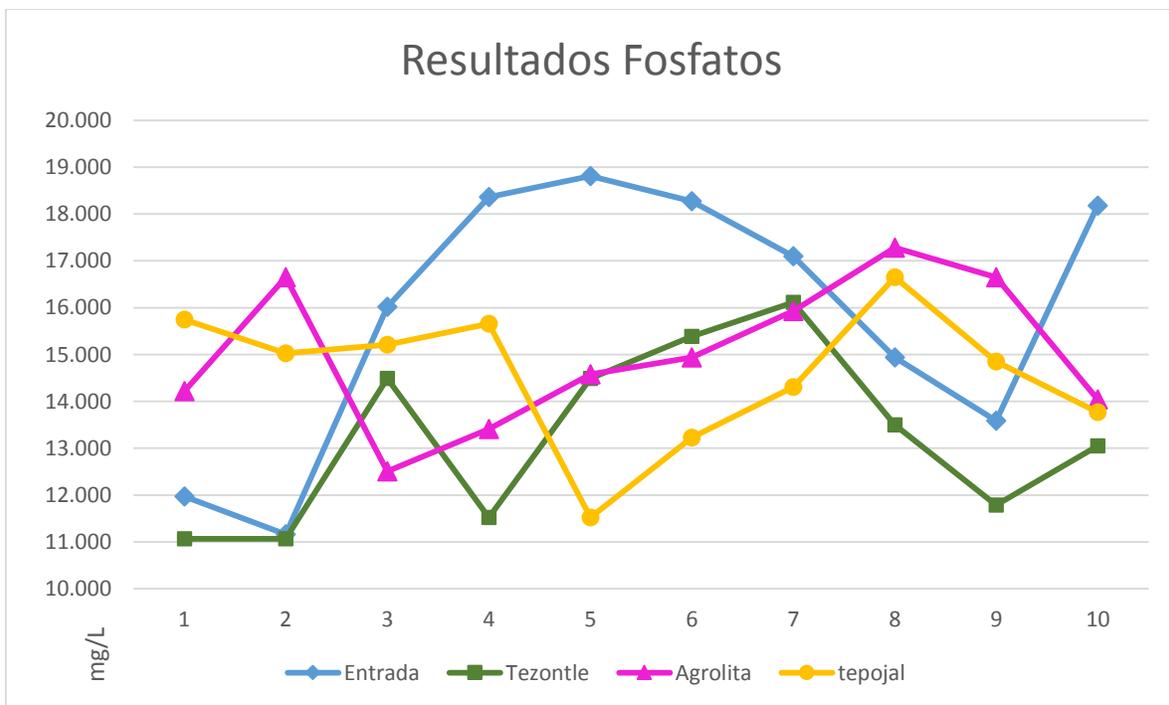
**Tezontle: 16.36%**

**Agrolita o perlita: 5.17%**

**Tepojal: 7.84 %**



**Figura 80.- Resultados de la determinación de las cantidades de Fósforo total presentes en el agua analizada. Gráfico de realización propia.**



**Figura 81.- Cantidades de Fosfatos presentes en las muestras de agua obtenidas de los módulos de humedales artificiales. Gráfica de elaboración propia**

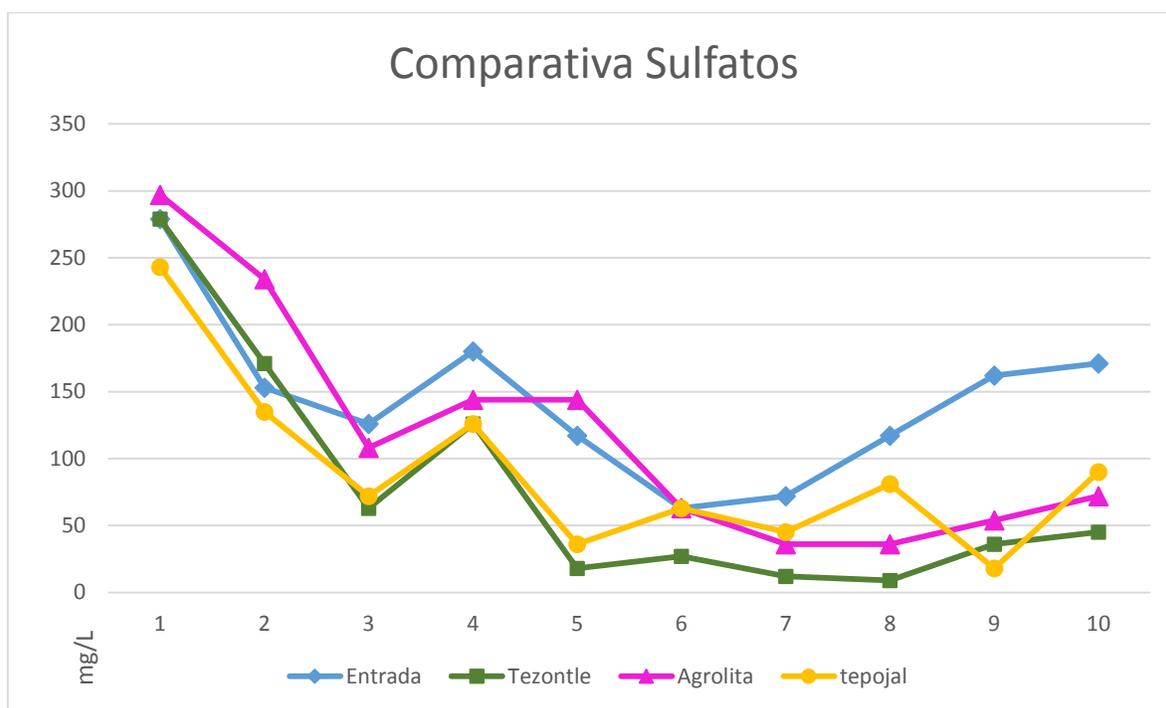
#### 4.2.4.- Sulfatos.

Los resultados detallados obtenidos de la determinación de las cantidades presentes de este contaminante en las muestras de agua analizada se pueden apreciar en el anexo F. En el caso de este factor, los porcentajes de remoción que se presentaron en los tres módulos de humedales artificiales fueron los siguientes:

**Tezontle: 45.42%**

**Agrolita o perlita: 17.5%**

**Tepojal: 36.88 %**



**Figura 82.- Resultados de la determinación de Sulfatos presentes en el agua antes de entrar y tras salir de los módulos de humedales artificiales. Gráfica de realización propia.**

#### 4.2.5.- Sólidos Suspendidos Totales (SST), Volátiles (SSV) y Fijos (SSF).

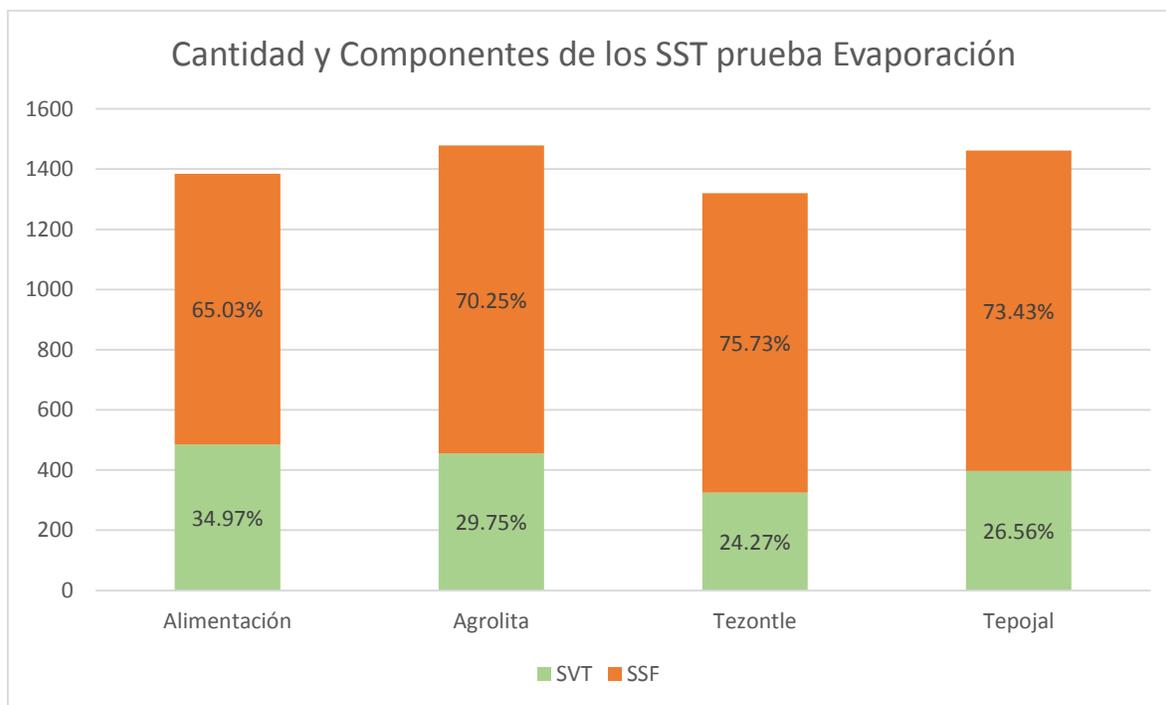
Para la determinación de este factor se ejecutaron las dos pruebas marcadas por la norma mexicana NMX-AA-034-SCFI-2001, y por tanto se obtuvieron productos por separado de cada una; sin embargo, los resultados numéricos detallados de ambas se pueden apreciar en el anexo G.

Primero, en la prueba de evaporación empleando cápsulas de porcelana, resultó que dos de los sustratos en lugar de reducir la cantidad de Sólidos Suspendidos Totales presentes en el agua

de alimentación, la aumentaron. Los porcentajes exactos que se presentaron en los humedales artificiales fueron:

**Tezontle: + 6.79%**      **Agrolita o perlita: -4.69%**      **Tepojal: +5.56 %**

Sin embargo, en la siguiente gráfica se puede apreciar los porcentajes de Sólidos Suspendingos Volátiles y Fijos que conformaron a los SST. Los motivos para que se presentara este comportamiento se analiza en el apartado de Discusión.

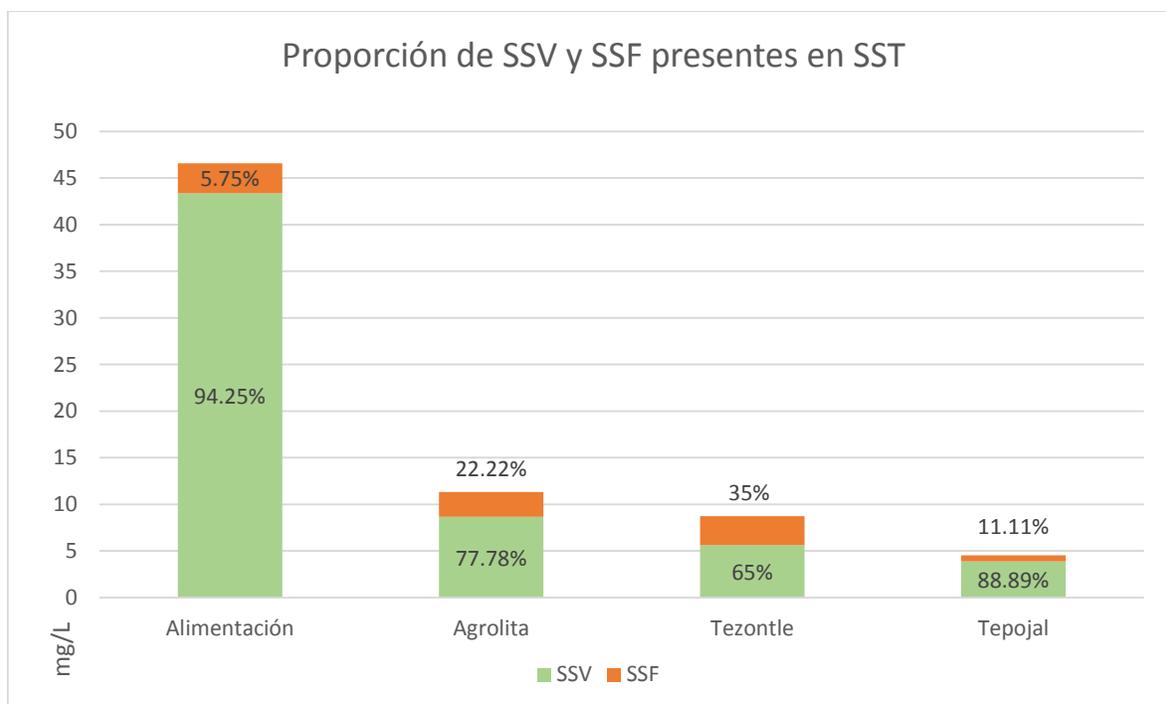


**Figura 83.- Cantidades de SST presentes en las muestras de agua y la proporción en porcentajes de SSV y SSF que los conformaron.** Gráfico de elaboración propia.

Por otro lado, en la prueba de filtración utilizando crisoles Gooch se apreció una importante diferencia entre las cantidades de SST presentes en las muestras de agua ya tratada por los humedales artificiales con respecto a las del agua de alimentación del prototipo, siendo los siguientes los porcentajes de disminución:

**Tezontle: 81.26%**      **Agrolita o perlita: 75.68%**      **Tepojal: 90.23 %**

Por último, en la siguiente gráfica se puede apreciar los porcentajes de Sólidos Suspendingos Volátiles y Fijos que conformaron a los SST determinados por la prueba ya mencionada.



**Figura 84.- Resultados y porcentaje de los componentes de los SST cuantificados en la prueba de filtración.**  
Gráfica de elaboración propia.

#### 4.2.6.- Determinación de pH

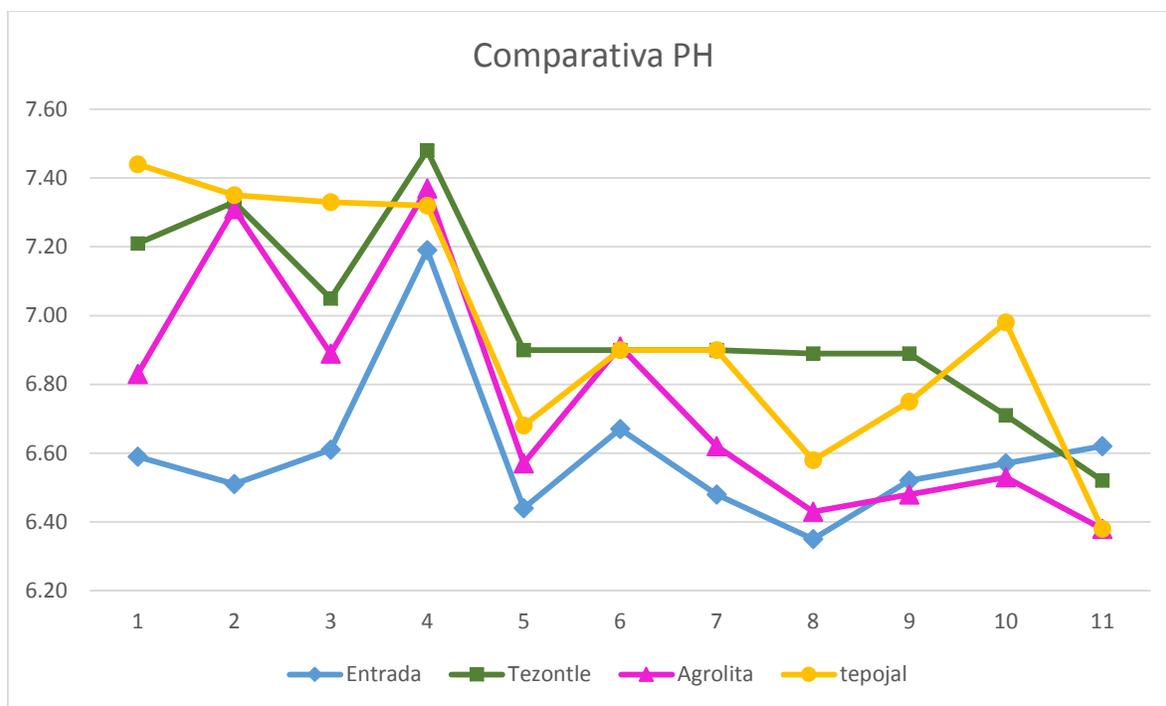
Con respecto a los resultados que generó la evaluación de este factor, se observó que el tratamiento de los humedales artificiales proporcionó iones hidroxilos al agua de alimentación, logrando así que a la salida de los prototipos, el líquido contara con un ligero aumento en su alcalinidad, consiguiendo que esta se encontrará en mayor proporción, dentro del rango de lo neutral. La cantidad promedio que aportó cada compuesto al agua fue la siguiente:

**Tezontle: 0.38**

**Agrolita o perlita: 0.16**

**Tepojal: 0.37**

Por último, a continuación se puede apreciar una gráfica que demuestra el comportamiento demostrado por los cuatro tipos de aguas analizadas. Los resultados detallados que se emplearon como base para la realización de la misma, se pueden apreciar en el Anexo H.



**Figura 85.- Lecturas de pH obtenidas de las muestras de agua analizadas.** Gráfica de elaboración propia.

#### 4.2.7.- Porcentaje de porosidad de los sustratos

Con base en el método y formulas descritas en el apartado de procedimientos para la determinación de este factor, se determinó que el porcentaje de porosidad de los tres materiales empleados como sustratos en los prototipos de humedales artificiales son los siguientes. El procedimiento se puede apreciar en el anexo I.

**Tezontle: 77%**

**Agrolita o perlita: 58%**

**Tepojal: 51 %**

#### 4.2.8.- Porcentaje de humedad en los sustratos.

Empleando el método y formulas descritas en el apartado de procedimientos para llevar a cabo el cálculo de este factor, se determinó que los porcentajes de humedad presentes en los sustratos empleados. Cabe mencionar que los pesos empleados como base para el cálculo de estos resultados se muestran en el apartado I.

**Tezontle: 9.59%**

**Agrolita o perlita: 22.51%**

**Tepojal: 6.51 %**

#### 4.2.9.- Cálculo de la velocidad de entrada y salida del agua de los humedales artificiales.

Este procedimiento se realizó dos veces de la manera que fue descrita en la metodología, por lo que los resultados obtenidos en cada una de ellas se pueden apreciar en el anexo J. Sin embargo, las velocidades promedio calculadas para los módulos de humedales artificiales, fueron las siguientes:

**Tezontle: 0.000614534 m/s**

**Agrolita o perlita: 0.000637139 m/s**

**Tepojal: 0.000631834 m/s**

#### 4.2.10.- Cálculo de la precipitación diaria en el área de estudio.

Con base en la metodología previamente descrita en el apartado de procedimientos, se logró determinar la cantidad de lluvia diaria que se produce en FES Aragón cada mes del año, así como los litros de agua de alimentación real que recibieron los prototipos de humedales artificiales.

Cabe mencionar que en el anexo K se pueden apreciar los materiales didácticos más importantes que se realizaron para lograr la determinación de estos datos. Los resultados de este apartado fueron los siguientes:

Tabla 18.- Litros totales de alimentación diarios con los que se contó en los módulos de humedales artificiales			
Mes	Precipitación captada diariamente (L)	Agua ingresada manualmente en cada módulo (L)	Total agua de alimentación diaria (L)
enero	0.19	5.00	5.19
febrero	0.41	5.00	5.41
marzo	0.43	5.00	5.43
abril	0.84	5.00	5.84
mayo	1.36	5.00	6.36
junio	3.94	5.00	8.94
julio	4.08	5.00	9.08
agosto	3.6	5.00	8.60
septiembre	3.05	5.00	8.05
octubre	1.54	5.00	6.54
noviembre	0.36	5.00	5.36
diciembre	0.15	5.00	5.15

Mes más lluvioso

Mes más seco

Tabla de elaboración propia.

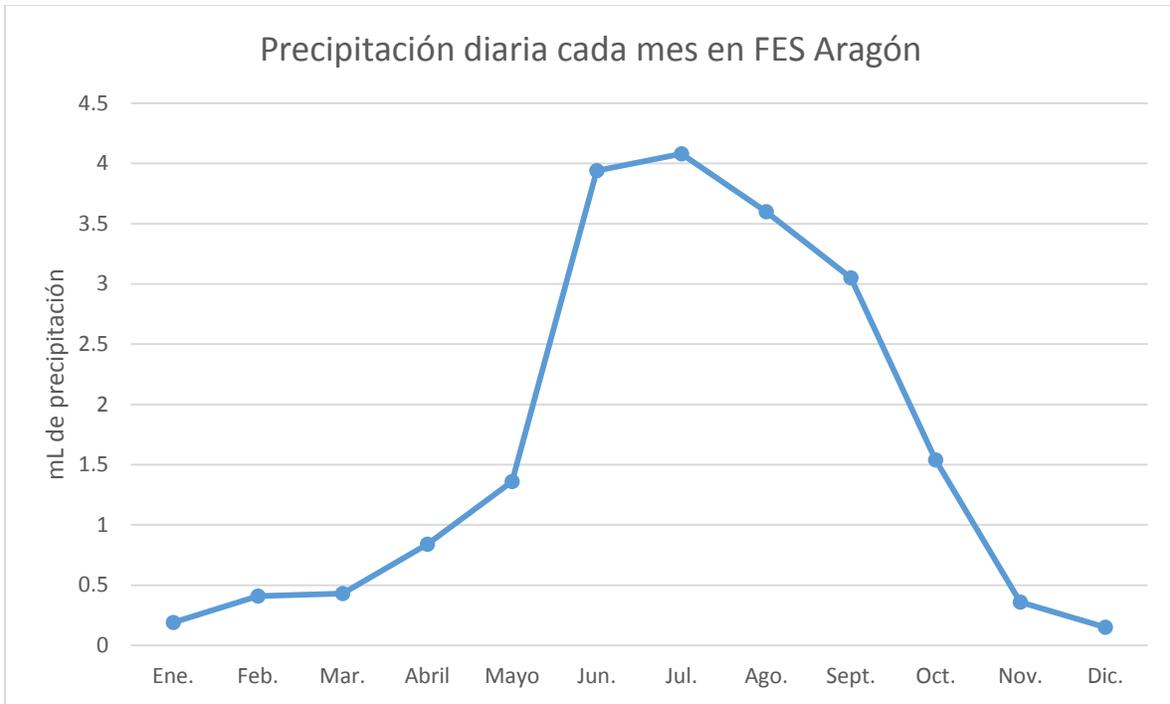


Figura 86.- Cantidad de agua de precipitación diaria que recibe la FES Aragón. Gráfica de elaboración propia.

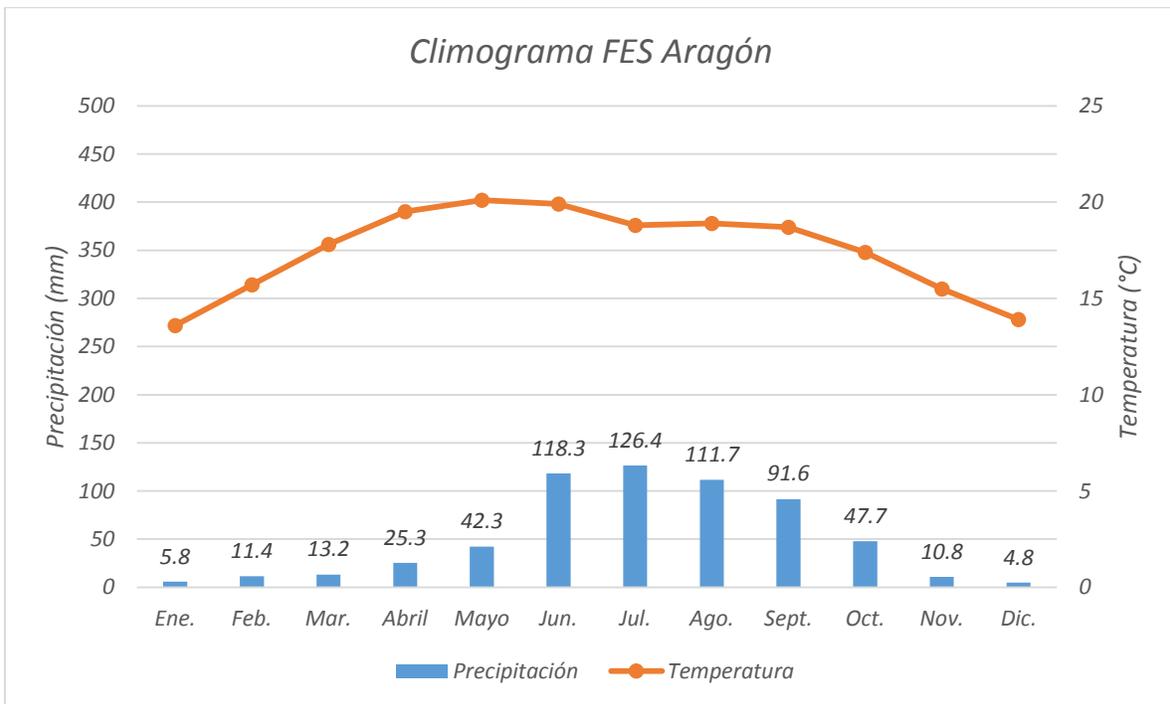


Figura 87.- Temperatura y precipitación presente en la FES Aragón. Gráfico de elaboración propia.

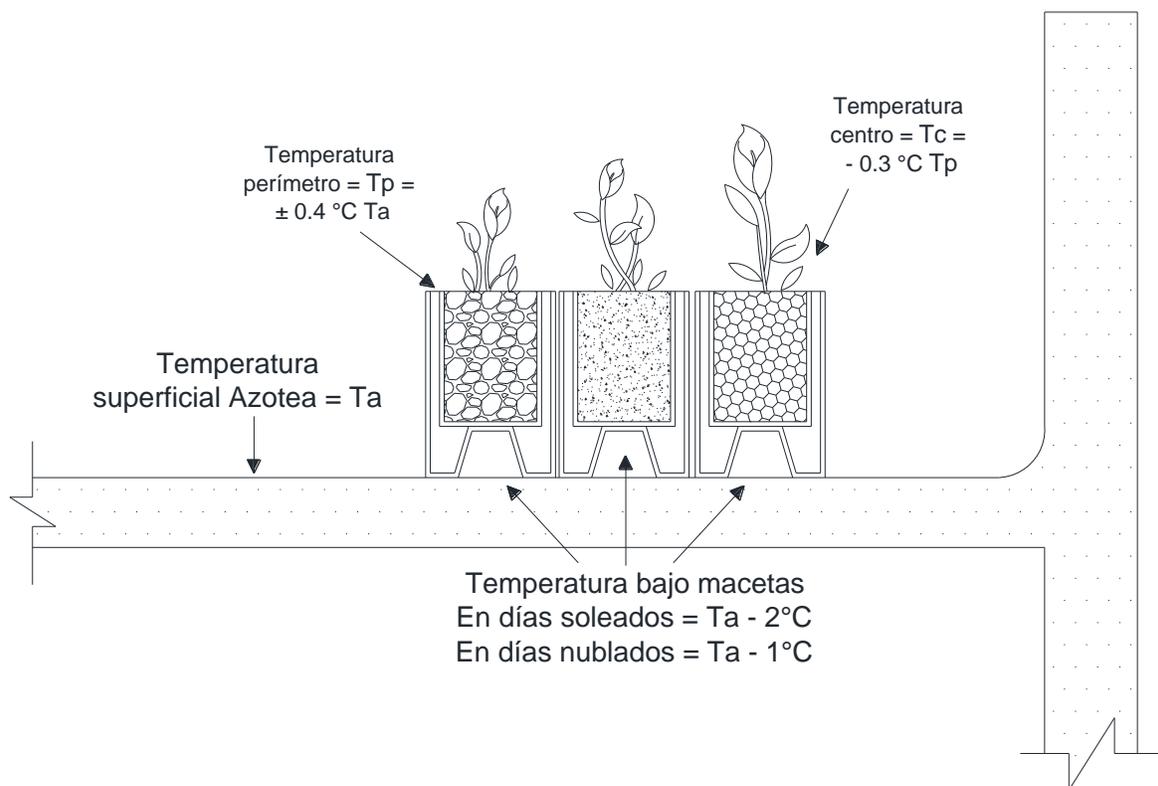
#### 4.2.11.- Determinación de Tiempo de Retención hidráulico.

Considerando los resultados obtenidos en los apartados de porcentaje de porosidad, porcentaje de humedad de los sustratos, la velocidad del agua, los litros totales de alimentación que recibieron los prototipos y los resultados arrojados por los muestreos para recolecta de agua, mismos que se pueden apreciar a detalle en el Anexo L, se obtuvo:

*El tiempo de Retención hidráulico que se presentó en los prototipos fue en promedio de 3 días.*

#### 4.2.12.- Determinación de las diferencias térmicas.

Con base en los resultados obtenidos a través de los muestreos de temperatura, los cuales se pueden verificar en el Anexo M, se pudo establecer que la instalación de los humedales artificiales elevados en el edificio muestra, produjo un aislamiento térmico al interior de este, el cual mostró el comportamiento apreciado en el siguiente esquema.



**Figura 88.- Esquema de diferencias térmicas registradas en la instalación de los prototipos de humedales artificiales.** Figura de realización propia.

Durante las mediciones se observó que entre la temperatura superficial de la azotea con la que se presentaba en el perímetro de los módulos, hubo en promedio una diferencia de  $\pm 0.4$  °C. Por otro lado, la temperatura del centro del humedal presentó una variación promedio de  $- 0.3$  °C con respecto al perímetro del mismo.

Por último, el dato más importante recabado con esta medición fue el hecho de que se presentó en promedio una diferencia de  $2$  °C entre la temperatura superficial de la azotea en los días soleados, y de  $1$  °C en los días nublados.

#### 4.2.13.- Cálculo de relación peso-rendimiento de los sustratos empleados

Para realizar este cálculo primero se definió el volumen de los módulos y, considerando los pesos volumétricos de los sustratos empleados así como un porcentaje para considerar la aportación de peso de los otros componentes de los prototipos,<sup>83</sup> se generó la una tabla con la que se establecieron los pesos teóricos de cada uno de los humedales artificiales realizados,<sup>84</sup> misma que se puede apreciar en el Anexo L.

**Tezontle: 54.68 kg      Agrolita o perlita: 17.78 kg      Tepojal: 38.81 kg**

Con base en estos datos, así como de otros que se pueden apreciar en el anexo L, se determinó lo siguiente:

Tabla 19.- Relación peso-rendimiento que ofrecen los tres sustratos empleados en la elaboración de los prototipos de humedales artificiales				
Relación	Tezontle	Agrolita	Tepojal	Notas generales
Carga final de los módulos de humedales artificiales	1.00	0.32	0.7	Un módulo de humedal artificial que utilice agrolita como sustrato, pesa un tercio de lo de uno que emplee tezontle rojo.
Tratamiento de agua gris (L)	1.00	1.05	1.12	Un módulo de humedal artificial que utilice tepojal como sustrato, produce 12% más de agua tratada en la misma cantidad de tiempo que uno que utiliza tezontle rojo

Tabla de elaboración propia.

<sup>83</sup> Por otros materiales se hace referencia a los humedales artificiales, las piezas de fibra de vidrio, mangueras y bombas.

<sup>84</sup> Las cantidades mostradas en este apartado se refieren al peso de cada módulo de humedal artificial que se genere utilizando dicho material como sustrato único, suponiendo que cada módulo sea una reproducción fiel de los prototipos instalados en el edificio muestra.

### 4.3 Discusión de resultados.

Para iniciar este apartado es necesario realizar un resumen de los resultados obtenidos:

Tabla 20.- Resumen de resultados de pruebas realizadas en los módulos de humedales artificiales				
Factor analizado	Unidad	Porcentaje de reducción		
		Tezontle	Agrolita	Tepojal
DQO	(mg/L)	80.92	62.88	86.96
Nitrógeno amoniacal	(mg/L)	72.84	74.72	71.32
Nitrito	(mg/L)	84.04	65.78	87.06
Nitrato	(mg/L)	6.79	16.67	27.16
Nitrógeno Total	(mg/L)	71.94	78.53	72.48
Fósforo	(mg/L)	5.23	1.65	3.07
Fosfatos	(mg/L)	16.36	5.17	7.84
Sulfatos	(mg/L)	45.42	17.5	36.88
<b>Determinación características generales</b>				
pH	-	0.38	0.16	0.37
Porcentaje de porosidad	%	77	58	51
Porcentaje de humedad	%	9.59	22.51	6.51
Velocidad del agua	(m/s)	0.000614534	0.000637139	0.000631834
Cantidad de agua tratada producida al día en promedio	L*día	1.89	1.98	2.13
Tiempo de retención hidráulico	día	3	3	3
Diferencia térmica promedio entre el perímetro y el centro de los humedales artificiales	°C	-0.24	-0.36	-0.33
Diferencia térmica promedio entre loza y bajo los humedales artificiales	°C	-2.41	-2.37	-2.42
Peso total por módulo de humedal	kg*pieza	54.68	17.78	38.81

Tablas de elaboración propia.

Tabla 21.- Resumen de los resultados de la determinación de los Sólidos Suspendedos Totales y sus componentes				
Procedimiento para determinación de SST	Fuente del agua	Promedio de SST (mg/L)	Componentes de los SST (%)	
			SSV	SSF
Evaporación	Alimentación	1385	29.75	65.03
	Tezontle	1320	29.75	70.25
	Agrolita	1479	24.27	75.73
	Tepojal	1462	26.57	73.43
Infiltración	Alimentación	46.59	94.25	5.75
	Tezontle	8.73	77.78	22.22
	Agrolita	11.33	65.00	35.00
	Tepojal	4.55	88.89	11.11

Considerando todos los valores obtenidos en cada uno de los parámetros físico-químicos que se analizaron del prototipo, se desprenden los siguientes comentarios:

- La disminución en las capacidades de remoción de DQO por parte de la agrolita coincidieron con una época de constantes precipitaciones. Al tiempo de estos sucesos, se observó que el material adquirió un tono verde, con lo que se asumió que la gran capacidad de retención de agua por parte de este, dio pie a la generación de algas y estas a su vez aportaron materia orgánica al líquido, causando así el fenómeno observado.
- Con respecto a la remoción de Nitrógeno, se apreció un gran porcentaje de disminución del nitrógeno amoniacal y del nitrito por parte de los tres sustratos, no obstante, en el caso del nitrato, el porcentaje fue mucho menor. Este comportamiento se entiende debido a que este es el último compuesto en la cadena de transformaciones del nitrógeno, por ello, la cantidad real de Nitrato a ser tratada dentro de los humedales artificiales, es la suma de la ingresada como parte del agua de alimentación y la producida por la oxidación del nitrógeno amoniacal y el nitrito respectivamente. Por este motivo, si no se produjera remoción de este contaminante dentro de los humedales artificiales, la cantidad de nitratos en el agua a la salida de los prototipos, sería mayor que la de ingreso.
- El porcentaje de disminución que se dio en el agua tratada con respecto al fósforo fue bajo, sin embargo, este comportamiento es congruente con lo observado en investigaciones previas donde, basados en comportamientos similares, se afirmó que no son un método de tratamiento ideal para utilizarse en la remoción de este elemento.
- Con respecto a los Sólidos Suspendidos Totales que se registraron en la prueba de evaporación, se pudo apreciar que los humedales artificiales no redujeron la cantidad de sólidos suspendidos totales.
- En la prueba de infiltración, se pudo apreciar una importante disminución de la cantidad de Sólidos Suspendidos Totales presentes en el agua antes y tras recibir el tratamiento.
- Los resultados de la prueba de pH indican que los humedales artificiales tienden a aportar iones hidroxilos al agua que tratan, lo que significa que poseen la capacidad de neutralizar acidez en el agua de alimentación.
- Solo en el humedal en el que se empleó tezontle rojo como sustrato, se pudo apreciar la presencia de gusanos, probablemente fomentado por el gran porcentaje de porosidad del

material. Sin embargo, es importante recalcar que la presencia de estos organismos coincidió con el hecho de que los alcatraces del humedal empezaron a disminuir de tamaño y la situación comenzó a remediarse a partir del retiro de estos. Por esto se concluyó que los gusanos estaban interfiriendo en el desarrollo y/o alimentación de las plantas y que los nutrientes estaban siendo captados por estos, en lugar de que los aprovecharan las plantas.

- La producción extra de materia orgánica que se evidenció dentro del humedal con agrolita como sustrato, pudo ser causada por el alto porcentaje de humedad del material, ya que esto generó que se retuvieran líquidos en su interior en mayor proporción que los otros dos.
- El bajo porcentaje de porosidad y humedad que demostró tener el tepojal, evitó que este material retuviera el agua más de lo necesario, generando que fuera el humedal que registró mayor velocidad en el tratamiento del agua gris.
- Las diferencias térmicas que se registraron entre el perímetro de los módulos de humedales artificiales con respecto a las del centro, se debieron a que los sustratos funcionaron como aislante para evitar el completo paso del calor que transmitía la fibra de vidrio, el cual podría haber afectado a los alcatraces.
- Con respecto a las diferencias de temperaturas, se pudo apreciar que ante fenómenos de calor excesivo, las diferencias de temperatura entre la azotea y debajo de los módulos aumentan hasta 3°C. Esto indica que, al menos en el área de estudio, la función aislante de este sistema se puede apreciar mejor entre mayor temperatura exista en el ambiente.
- Considerando los resultados de todas las pruebas físico químicas realizadas, se puede apreciar que los humedales con tezontle rojo y tepojal demostraron tener porcentajes de rendimiento y reducción de contaminantes muy similares. No obstante, dado que en una comparativa de pesos, la utilización de tepojal significa una reducción del 30% de la carga final del sistema con respecto a la del tezontle rojo, así como un aumento en la velocidad del tratamiento de agua del 12%, se consideró que el sustrato más idóneo para la generación de humedales artificiales elevados es el tepojal. Con esto la hipótesis principal se confirmó.
- Debido a que la instalación de los prototipos se llevó a cabo dentro de un centro educativo, los humedales artificiales estuvieron expuestos a dos períodos de abstinencia de agua a causa de los períodos vacacionales administrativos, a los cuales sobrevivieron sin mayor problema. Demostrando así que la combinación de materiales empleada funcionó para el área de estudio.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. Tras realizar el desarrollo del experimento y la correspondiente comparativa de resultados, se concluyó que la hipótesis se cumplió, encontrando que de los tres sustratos estudiados, el tepojal es aquel que demostró tener una mejor relación entre su peso y su capacidad para remover contaminantes.
2. La calidad del agua del agua obtenida con los módulos, permite su reutilización en riego de áreas verdes o agua para inodoro.
3. El sistema de humedales artificiales elevados genera una mayor diferencia térmica al interior de la edificación entre mayor sea la temperatura al exterior de esta.
4. Potencialmente, el agua tratada por el sistema podría emplearse para regar azoteas verdes de menor carga. Logrando así que las diferencias térmicas se presenten en toda la azotea de las edificaciones.
5. Debido a las diferencias de peso en entre el tepojal y el tezontle rojo, se comprobó que los humedales con tepojal tienen un mayor potencial de instalación en las azoteas de los edificios existentes.
6. Los humedales artificiales no son un método idóneo para llevar a cabo la reducción de fósforo en el agua. En caso de querer emplear esta tecnología con este fin, es necesario buscar métodos o materiales que refuercen las capacidades de tratamiento de los humedales artificiales con respecto a este contaminante.
7. La recreación del sistema humedales artificiales de flujo sub-superficial, si puede llevarse a cabo dentro de macetas elevadas en azotea.
8. El generar humedales artificiales de poca profundidad disminuyó el peso de los prototipos y propició una mayor remoción del nitrógeno y sus derivados en el agua.
9. Se determinó que el promedio de tiempo de retención hidráulico que se presentó en los módulos de humedales artificiales fue de tres días. Este tiempo fue suficiente para que el agua se limpiara y tuviera las condiciones adecuadas para ser reutilizada en otras actividades. Por ejemplo, se puede colocar este sistema de humedales en azotea junto con un jardín verde, de esta manera se trata el agua gris, así como el agua de lluvia, y la resultante se podría utilizar para el riego del jardín verde; en caso de contar con excedente, se emplearía para la limpieza de otras áreas.

Ahora, con respecto a las recomendaciones que se hacen a futuro para este tema, serían:

- Por los tiempos con los que se contó para el desarrollo de esta investigación, los prototipos trataron durante el experimento únicamente con agua gris generada en laboratorio. A futuro, este sistema debieran ser estudiados siendo alimentados con agua gris obtenida directamente de algún edificio muestra, y de ser posible, conectados directamente al mismo.
- En el caso del contaminante fósforo, investigaciones previas han demostrado que la grava rica en hierro y aluminio tiene la capacidad de tratarlo. Por tanto, a futuro se pueden establecer los resultados del sistema si se recrea adicionando un porcentaje de este material al tepojal.
- Este tema de investigación se desarrolló hasta donde permitió el tiempo que se contó para la misma. A partir de este punto, las investigaciones posteriores a desarrollar se pueden enfocar en estos puntos:
  - Funcionamiento y rendimiento de los módulos de humedales artificiales conectados en serie de tres o más.
  - Adaptación del sistema a espacios verticales a fin de lograr una mayor utilización de los espacios libres.
  - Generación de una propuesta para suplir la bomba de agua y así evitar la principal fuente de gasto energético con la que cuenta el sistema.
- Los resultados y rendimientos obtenidos en este trabajo, hacen alusión a lo generado por un solo módulo de humedal artificial. Por ello, si se conectaran módulos en serie, los resultados pueden modificarse. Por ejemplo, habría que observar si a través de esta conexión, contaminantes tales como el fósforo son disminuidos en mayor cantidad que lo observado en este trabajo.
- No se descarta la posibilidad de que el modelo de maceta-humedal desarrollado, debiera recrearse en otro material distinto a la fibra de vidrio, para así establecer si se presentan mejores rendimientos o disminución de la carga final.

## FUENTES

### Bibliografía

- Aguilar Juárez, D. (06 de Junio de 2011). Pagan más capitalinos por sus casas. *El Universal*.
- Aguilar Reyes, E. (2009). *Captación de agua pluvial y su aprovechamiento en zonas rurales y urbanas*. Tesis de Licenciatura, México.
- Álvarez Enríquez, L., San Juan Victoria, C., & Sánchez Mejorada, C. (2006). *Democracia y exclusión: caminos encontrados en la Ciudad de México*. Ciudad de México, UNAM 135-136.
- Anaya Garduño, M. (2011). *Captación del agua de lluvia. Solución caída del cielo*. México: BBA.
- Arroyo Hernández, P. (2010). *Los humedales construidos como sistemas para el tratamiento de agua residual insustrial y urbana. Caracterización de las comunidades de bacterias presentes en estos ecosistemas*. Tesis de licenciatura de Ecología, Universidad de León, Madrid, España.
- Athie Lambarri, M. (1987). *Calidad y cantidad del agua en México*. Ciudad de México: Veintiuno.
- Bazart, J. (2008). *Espacios urbanos: historia, teoría y diseño*. Ciudad de México: Limusa.
- Delgadillo, O., Camacho, A., Pérez, L., y Andrade, M. (2010) *Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales*. Cochabamba, Bolivia: Centro Andino para la gestión y el uso del agua.
- García de Miranda, E. (1988). *Apuntes de climatología* (Quinta ed.). Distrito Federal, México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- García de Miranda, E. (2004). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen* (quinta ed.). Distrito Federal, México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Herce Vallejo, M. (2013). *El negocio del territorio: evolución y perspectivas de la ciudad moderna*. Madrid: Alianza.
- Hernández Hernández, E. (2013). *Guía básica del cultivo de alcatraz (zantedeschia sp.) y nociones para su propagación*. Trabajo de experiencia recepcional, Universidad Veracruzana, Facultad de Ciencias Agrícolas, Xalapa, Veracruz.
- Hoffman, H., Platzer, C., Winker, M., & Von Muench, E. (2011). Technology review of constructed wetlands. *Agencia de cooperación internacional de Alemania, GIZ. Programa de saneamiento sostenible*. Munich: ECOSAN.
- Izembart, H., & Le Boudec, B. (2003). *Waterscapes; el tratamiento de aguas residuales mediante sistemas vegetales*. Barcelona: GG.
- Lahora, A. (2003). Depuración de aguas residuales mediante humedales artificiales: La EDAR de los Gallardos (Almería). En M. (. Paracuellos, *Ecología, Manejo y Conservación de Humedales* (págs. 99-112). Almería, España: Instituto de Estudios Almerienses.
- Lara Borrego, J. A. (1999). *Depuración de Aguas Residuales Municipales con Humedales Artificiales*. Tesis de Máster en Ingeniería y Gestión Ambiental, Universidad Politécnica de Cataluña, Instituto Catalán de Tecnología, Barcelona.

- López de Lucio, R. (2013). *Vivienda colectiva, espacio público y ciudad: evolución y crisis en el diseño de tejidos residenciales 1860-2010*. Buenos Aires: Nabuko.
- Márquez Vazquez , M., & Martínez González, S. A. (2011). *Cuaderno de apuntes "fundamentos teóricos para el diseño de Humedales Artificiales*. Trabajo derivado del subproyecto PAPIME EN105103 con título "Diseño, construcción, arranque y operación de modelos piloto de procesos biológicos unitarios para tratamiento de aguas residuales", México.
- Márquez Vazquez, M. (2004). *Diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales para la escuela nacional de estudios profesionales Aragón, empleando ecotecnologías (humedales artificiales)*. Tesis de licenciatura, México.
- Martínez , J., & Ruano, P. (1998). *Aguas subterráneas: Captación y aprovechamiento*. Ciudad de México: Mundo.
- Metcalf & Eddy, I., Burton L., F., Tchobanogluos , G., & Stensel , D. (2003). *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*. New York: McGraw-Hill.
- Molina, A. M., & Trigueroz Gutierrez , J. L. (2005). *Evaluación Preliminar de la remoción de solidos Suspendidos en el Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales del Municipio de Arauca*. Tesis de Ingeniería Ambiental, Universidad Nacional de Colombia, Ingeniería Ambiental , Arauca.
- Molleda Martínez, P. (2011). *Aplicación de humedales construidos en la reducción de patógenos y otros contaminantes en agua residual y ganadera*. Tesis de licenciatura de ecología, León, España.
- Mollison , B., & Slay, R. M. (2003). Principios de permacultura. En M. Bill, & R. M. Slay, *Introducción a la permacultura* (págs. 5-30).
- Ortiz Moreno, J. A., Masera Cerutti, O. R., & Fuentes Gutiérrez , A. F. (2014). Conceptualización de la ecotecnología. En J. A. Ortiz Moreno, O. R. Masera Cerutti, & A. F. Fuentes Gutiérrez, *La ecotecnología en México*. México: Imagia Comunicación.
- Peralta Moreno, J. (2001). *Regularización del sistema de abastecimiento de agua potable de la zona norte de Cd. Nezahualcóyotl en Estado de México*. Tesis de licentura. Ciudad de México, UNAM.
- PUMAGUA. (2010). *Anexo de investigación sobre la situación hidrica de FES Aragón*. Informe Resultados de Investigación, México.
- Soto Montes de Oca, G. (2007). *Agua: Tarifas, escasez y sustentabilidad en las Megaciudades*. Ciudad de México: Universidad Iberoamericana.
- Valicelli, L., & Pesci, R. (2002). *Las nuevas funciones urbanas: gestión para la ciudad sostenible*. Santiago de Chile. Naciones Unidas: Milenio.
- Zamorano V., S. (2009). *Produccion de Calas (Zantedeschia spp.)*. Universidad de Chile, Facultad de ciencias Agronómicas , Santiago de Chile. Escuela de Agronomía, 1-16.

## Revistas

- Acosta, D. (2009). Arquitectura y construcción sostenibles: conceptos, problemas y estrategias. *Revista de Arquitectura de la Universidad de los Andes*, 17-22.

- Agudelo, R., Jaramillo, M., Peñuela, G., & Aguirre, N. (24 de Marzo de 2010). Remoción del carbono orgánico disuelto en humedales piloto de flujos subsuperficial y superficial. *Revista Facultad Nacional de Salud Pública*, 25-35.
- Anaya Garduño, M. (2008). Objetivos y logros del Centro Internacional de Desmostración y Capacitación en Aprovechamiento del Agua de Lluvia (CIDECALLI). *Archivo histórico del agua*, 92-98
- Anaya Garduño, M. (2011). Escasez de agua en América Latina y el Medio Oriente. Estudio de casos, problemas y soluciones. *Universidad de las Américas, Puebla*, 140-148.
- Arias, S., Betancur, F., Gómez, G., Salazar, J., & Hernández, M. (2010). Fitorremediación con humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales porcinas. *Informador Técnico*, No. 74, 12-22.
- Ballantine, D., & Tanner, C. (2010). Substrate and filter materials to enhance phosphorus removal in constructed wetlands treating diffuse farm runoff: a review. *New Zealand Journal of Agriculture Research*.
- Barkin, D. (2010). La gestión urbana del agua en México. Retos, debates y bienestar. *Universidad de Guadalajara*.
- Buck, R., Rondinini, S., Covington, A., Baucke, F., Brett, C., Camoes, M., . . . Wilson, G. (2002). Measurement of pH. Definition, Standards, and procedures (IUPAC Recommendations 2002). *Pure Appl. Chem.*, 74(11), 2169–2200.
- Cabrera-Marcet, E. (2015). Retos del agua para usos residenciales e industriales. *Agua y Territorio*, 100-107.
- Capel, H. (1997). Los inmigrantes en la ciudad: crecimiento económico, innovación y conflicto social. *Scripta Nova: revista electrónica de Geografía y Ciencias Sociales*, 3.
- Carbajal, J. (2013). Llovió y ¿Dónde quedó el agua de lluvia? *Visión tecnológica*, V(6), 58-62.
- Cofie O. O., S. Agbottah, M. Strauss, H. Esseku, A. Montangero, E. Awuah, and D. Koné. (2006) Solid-liquid separation of faecal sludge using drying beds in Ghana: implications for nutrient recycling in urban agriculture.» *Water Research*, 75-82.
- Díaz, A., Atencio, V., & Pardo, S. (2014). Assessment of an artificial free-flow wetland system with water. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*(27), 202-210.
- Haiming, W., Jian, Z., Huo Hao, N., Wenshan, G., Zhen, H., Shuang, L., . . . Hai, L. (2014). A review on the sustainability of constructed wetlands for wastewater treatment: Design and operation. *Bioresour. Technology*. 175:594-601
- Hernandez Moreno, S. (2008). El Diseño Sustentable como Herramienta para el desarrollo de la arquitectura y edificación en México. *Acta Universitaria*, 18-23.
- Jiménez Velázquez, M., & Asteiza Bilbao, G. (2008). Sistemas de abastecimiento de agua para consumo doméstico en tres comunidades. de la porción alta del río Temascalíto, Estado de Guanajuato. *Archivo histórico del agua*, 44-54.
- Lofrano, G., & Brown, J. (2010). Wastewater management through the ages: A history of mankind. *Science of the total Environment*, 5254-5264.

- Martínez González, S. A. (2010). Calidad del agua en la Facultad de Estudios Superiores Aragón. *Revista electronica UNAM*.
- Martos Nuñez, E., & Martos García, A. (2015). Memorias e imaginario del agua: nuevas corrientes y perspectivas. *Agua y Territorio*, 121-132.
- Meza Aguilar, M., & Moncada Maya, J. (2010). Las áreas verdes en la ciudad de México. Un reto actual. *Scripta Nova: Revista electrónica de Geografía y Ciencias Sociales*. XIV, 56.
- Padrón Cruz, A. C., & Cantú Martínez, P. C. (2009). El recurso agua en el entorno de las ciudades sustentables. *Culcyt*, 15-25.
- Padrón Cruz, A. C., & Cantú Martínez, P. C. (2009). El recurso agua en el entorno de las ciudades sustentables. *Culcyt*, 15-25.
- Ramírez, B. (2006). Del funcionalismo industrial al de servicios: ¿La nueva Utopía de la metrópoli postindustrial del Valle de México? *Eure*, 61-74.
- Ramírez, E. (2008). Impactos del cambio climático y gestión del agua sobre la disponibilidad de recursos hídricos para las ciudades de La Paz y El Alto . *REDESMA*, 50-61.
- Rodríguez Díaz, E., Salcedo Pérez, E., Rodríguez Macias, R., González Eguiarte, D. R., & Mena Munguía, S. (2013). Reúso del Tezontle: Efecto en sus características físicas y en la producción de tomate. *Terra Latinoamerica*, 275-284.
- Romero, M., Colín, A., Sánchez, E., & Ortiz, L. (12 de Enero de 2009). Tratamiento de aguas residuales por un sistema piloto de humedales artificiales: evaluación de la remoción de la carga orgánica. *Revista Intenacional de contaminación ambiental*, 36-46.
- Rouquerol, J., Avnir, D., Fairbridge, W. C., Everett, D. H., Haynes, J. H., Pernicone, N., . . . Unger, K. K. (Junio de 1994). Recommendations for the characterization of porous solids. *Pure & Appl. Chem.*, 66(8), 1739-1758.
- Sayadi, M., Kargar, R., Doosti, M., & Salehi, H. (2012). Hybrid constructed wetlands for wastewater treatment: A worldwide review. *Proceedings of the International Academy of Ecology and Environmental Sciences*, 2(4), 204-222.
- Setty, K. (2010). Manual de Construcción: Humedales construidos para el tratamiento de aguas negras. *Bren School of Enviromental Science and Management, University of California, Santa Bárbara*, 99-115.
- Tanner, C., Sukias, J., & Yates, C. (2010). Multi-year nutrient removal of three constructed wetlands intercepting drainage flows from intensively grazed pastures. *Journal of Environmental Quality*.
- Trebilcock, M. (2009). Proceso de Diseño Integrado: nuevos paradigmas en arquitectura sustentable. *Arquiteturarevista*, 5(2), 65-75.
- Villegas Gómez, J. D. (2006). Septic tank-upflow anaerobic filter subsurface flow constructed wetland systems aimed at wastewater treatment in small localities in Colombia. *Revista tecnica de la Universidad de Zulia*, 3.
- Vymazal, J. (2010). Constructed Wetlands for Wastewater Treatment. *Water*, 530-549

Yocum, D. (2011). Manual de diseño: Humedales construidos para el tratamiento de las aguas grises por Biofiltración. *Bren School of Environmental Science and Management, University of California, Santa Bárbara*, 1-16.

## Medios electrónicos

Agencia Iberoamericana para la difusión de la ciencia y la tecnología. (15 de Marzo de 2010). *Dicyt*. Obtenido de Dicyt: <http://www.dicyt.com/noticias/identifican-las-bacterias-presentes-en-humedales-artificiales-para-optimizar-estos-sistemas-de-depuracion>

Cámara de Diputados, H. Congreso de la Unión. (Junio de 2009). Perfil socioeconómico del Distrito Federal. Ciudad de México.

Castro Reis, M., S. R. Magalhães Orrico, M. Medeiros Martins, L. R. Santos Moraes, R. Silveira Bernardes, and G. Barbosa Melo. (2012) *O emprego de "weland" para o tratamento de esgotos domésticos*. Recuperado el 25 de Noviembre de 2015, de [http://www.semase.sp.gov.br/Documentos/ASSEMAE/Trab\\_110.pdf](http://www.semase.sp.gov.br/Documentos/ASSEMAE/Trab_110.pdf)

CICEANA. (2002). *Saber más... ciclo del Nitrógeno*. Informe de divulgación, Centro de Información y Comunicación Ambiental de Norte América, A.C., Ciudad de México. Recuperado el 02 de Diciembre de 2015, de [http://www.divulgacion.ccg.unam.mx/webfm\\_send/109](http://www.divulgacion.ccg.unam.mx/webfm_send/109)

CLADIMACO. (2016). *CLADIMACO*. Obtenido de <http://www.cladimaco.com/jal.html>

Comisión Nacional del Agua. (2014). *Estadísticas del agua en México, edición 2014*. CONAGUA, Mexico, D.F. Recuperado el 20 de Marzo del 2015, de [http://conagua.com.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/SINA/Capitulo\\_8.pdf](http://conagua.com.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/SINA/Capitulo_8.pdf)

Consejo Nacional de Población. (2014). Proyecciones de la población 2010-2050. *CONAPO*, 35. Recuperado el 6 de 2015 de <http://www.gob.mx/conapo>

Delgado Peralta, M. (06 de Noviembre de 2007). *CEJA*. Recuperado el 16 de Mayo de 2015, de Agua para el distrito federal: retos y propuestas: [http://www.ceja.org.mx/articulo.php?id\\_rubrique=24&id\\_article=150](http://www.ceja.org.mx/articulo.php?id_rubrique=24&id_article=150)

Departamento de Asuntos Economicos y Sociales de Naciones Unidas (ONU-DAES). (24 de Noviembre de 2014). *un.org*. Recuperado el 2016 de Febrero de 10, de [http://www.un.org/spanish/waterforlifedecade/water\\_cities.shtml](http://www.un.org/spanish/waterforlifedecade/water_cities.shtml)

Ecoeficiencia, el Salvador. (16 de Julio de 2012). *ecoeficienciasal*. Obtenido de ecoeficienciasal: <https://ecoeficienciasal.wordpress.com/tag/ecoeficiencia-el-salvador/>

Gobierno del Estado de Chihuahua. (2009). Situación actual y perspectivas del desarrollo urbano. En *Plan de desarrollo urbano de la ciudad de Chihuahua: visión 2040* (págs. 46-75). Chihuahua.

González Verdecia, D. (junio de 2014). *Ecured*. Obtenido de Compuestos del Fosfóro: [https://www.ecured.cu/Compuestos\\_del\\_f%C3%B3sforo](https://www.ecured.cu/Compuestos_del_f%C3%B3sforo)

Hach Company. (2010). *TNT plus 832 Amonio, Rango alto*. Instructivo e información detallada del producto. Recuperado el 25 de Mayo de 2016

Hach Company/Hach Lange GmbH. (2014). *Nitrite, Diazotization TNTPlus Method (0.600 mg/L)*. Instructivo y características general del producto. Recuperado el 18 de Mayo de 2016

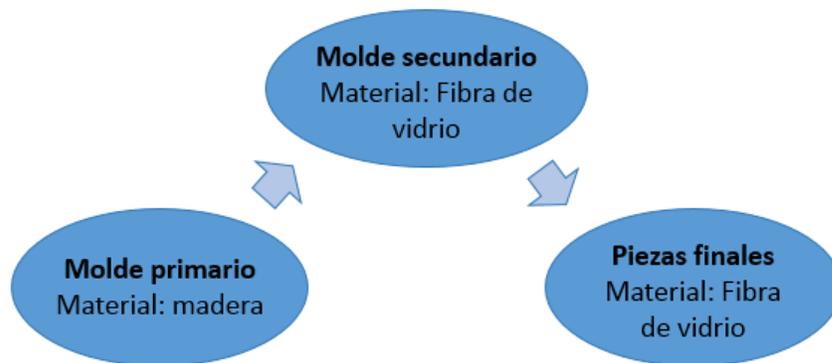
- Hach Company/Hach Lange GmbH. (2014). *Oxygen Demand, Chemical, Dichromate Method (multi-range: 40.0, 150, 1500, 15,000 mg/L)*. Hach. Recuperado el 30 de Abril de 2016
- Hach Company/Hach Lange GmbH. (2014). *Phosphorus, Reactive (Orthophosphate)*. Instructivo y descripción general del producto.
- Hach Company/Hach Lange GmbH. (2014). *SULFATE SulfaVer 4 Method (0 to 70 mg/L)*. Instructivo y descripción general del producto.
- Hach Company/Hach Lange GmbH. (2015). *NITRATE, High Range, Test 'N Tube (0 to 30.0 mg/L NO<sub>3</sub>- - N)*. Instructivo y descripción de las características del producto.
- Hernández, N. B., & Lezama, F. A. (2015). Características de los principales sustratos para la producción protegida de alimentos. Recuperado el 2 de Septiembre de 2015 de <http://www.hortalizas.com/horticultura-prottegida/en-busca-del-sustrato-ideal/>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (junio de 2012). *INEGI. Delimitación de las zonas metropolitanas de México 2010*. Recuperado el 05 de marzo de 2016, de: <http://www.inegi.org.mx/Sistemas/multiarchivos/doc/702825003884/DZM20101.pdf>
- Instituto Nacional para el Federalismo y Desarrollo Municipal (INAFED). (s.f.). *Enciclopedia de los municipios y delegaciones de México*. Recuperado el 15 de Abril de 2016, de <http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM09DF/delegaciones/09007a.html>
- Lenntech. (2016). *Lenntech*. Obtenido de <http://www.lenntech.es/sulfatos.htm>
- Marcos Noriega, R. (2009). *Propiedades físicas de los materiales*. Taller de arquitectura -Construcción-III, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Arquitectura. Recuperado el 23 de Mayo de 2015, de [http://www.paginaspersonales.unam.mx/files/729/tabla\\_de\\_pesos.pdf](http://www.paginaspersonales.unam.mx/files/729/tabla_de_pesos.pdf)
- Massol-Deyá, A., Fuentes F. (2008). *Determinación del contenido de humedad en suelo*. Manual de Ecología Microbiana, Universidad Nacional Autónoma de México, Departamento de Biología, Ciudad de México. Recuperado el 5 de Junio de 2016, de <http://www.uprm.edu/biology/profs/massol/manual/p2-humedad.pdf>
- Moreno Pérez, S. (2007). El debate sobre el desarrollo sustentable o sostenible y las experiencias internacionales de desarrollo urbano. *Centro de Estudios Sociales y de Opinión Pública*. Recuperado el 17 de febrero de 2016
- Rodríguez Bayon, J. (30 de Junio de 2009). *caminospaisvasco.com*. Recuperado el 25 de enero de 2014, de *Sistemas urbanos de drenaje sostenibles SUDS*: <http://caminospaisvasco.com/Profesion/Publicaciones%20de%20nuestros%20colegiados/suds>
- Secretaría de Economía. (2002). *Análisis de agua - Determinación de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Metodó de prueba*. Norma Mexicana, CONAGUA, Distrito Federal. Recuperado el 20 de Octubre de 2015, de <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Noticias/nmx-aa-034-scfi-2015.pdf>
- Secretaría de Economía. (2012). *Análisis del agua - Determinación del pH - Método de Prueba*. Norma Mexicana, Ciudad de México. Obtenido de [http://lasa.ciga.unam.mx/monitoreo/images/biblioteca/41%20NMX-AA-008-SCFI-2011\\_pH.pdf](http://lasa.ciga.unam.mx/monitoreo/images/biblioteca/41%20NMX-AA-008-SCFI-2011_pH.pdf)

- Secretaría de Economía. (2015). *Análisis de agua - Medición de Ion Sulfato en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de prueba*. Norma Mexicana, Ciudad de México. Recuperado el 01 de junio de 2016, de <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Noticias/NMX-AA-074-2014.pdf>
- Secretaría del Medio ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2012). Agua. *SEMARNAT*, 98-102. Recuperado el 21 de abril de 2016
- Serrano Dina, M. I. (27 de Noviembre de 2012). Diferencia entre sostenible y sustentable. *La información*. Recuperado el 13 de febrero de 2016.
- Sistema de Información del Medio Ambiente. (2007). *Anexo 5: Nitrógenos Totales*. Lima. Recuperado el 15 de abril de 2016.
- Transparencia Medio Ambiente. (2010). *Transparencia Medio Ambiente*. Recuperado el 27 de Octubre de 2014, de ¿Cómo se abastece el agua en México?
- Camara de Diputados del H. Congreso de la Union. (2013). Ley de Aguas Nacionales. Ciudad de México.
- Villegas, D. (06 de Diciembre de 2015). DF, con 66% del PIB per cápita más bajo de EU. *El Financiero*. Recuperado el 10 de Diciembre de 2014
- Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). (2012). *Modelo de Marco Institucional para la Gestión de Recursos Hídricos en el Valle de México*. . Informe de resultados de investigación, Distrito Federal. Recuperado el 14 de enero de 2014, de Modelo de Marco Institucional para la Gestión de Recursos Hidricos en el Valle de México.
- Water and Sanitation Program (WSP) for Latin America and the Caribbean, World Bank, SDC, UNICEF, and Inter-American Development Bank. (2007). *Saneamiento para el desarrollo: ¿Como estamos en 21 países de América Latina y el Caribe?* Regional publication prepared for LATINOSAN 2007 sanitation conference.

## Anexos

### Anexo A.- Proceso de elaboración de las macetas de fibra de vidrio:

Para llevar a cabo la elaboración de cada uno de los seis módulos necesarios para completar los prototipos fue necesario la realización de varias etapas constructivas, mismas que se resumen en el siguiente esquema:



**Imagen 1.- Etapas generales del proceso de creación de las macetas-humedales.** Imagen de elaboración propia.

#### 1. Creación de moldes primarios.

Las medidas y forma de este primer molde deben ser una copia exacta a las piezas que se desea obtener como producto final. En el prototipo de esta investigación se utilizó un modelo de maceta doble (A y B) por lo que, empleando madera, se generaron dos de estos moldes.

#### 2. Elaboración de moldes secundarios

Los moldes secundarios se refieren a dos o más piezas de fibra de vidrio que al ser unidas en el orden correcto, forman una figura que puede contener en su interior, una pieza idéntica en medidas y características a las del molde primario. Cabe señalar que entre mayor sea la cantidad de piezas que conformen a este molde, mayor será su durabilidad y facilidad del trabajo. El proceso de elaboración de esta pieza se divide en tres fases.



**Imagen 2.- Fases que conforman el proceso de creación de las piezas en fibra de vidrio.** Esquema de elaboración propia.

a) *Preparación del molde:*

- Se define la cantidad de fragmentos que conformaran al molde secundario. Cada fragmento se elabora de uno por uno, encima del molde primario.
- Se selecciona el primer fragmento a fabricar y el área del molde de madera que se va a usar como base de este.
- La superficie del molde primario a utilizar, se aísla del resto del molde empleando “pestañas separadoras”. Estas sirven para crear las juntas de donde se podrán unir las piezas que conforman al molde secundario.
- Usando una esponja, toda el área de trabajo se cubre con 8 capas de cera desmoldante. Se espera a que cada capa se seque antes de aplicar la siguiente.
- Se aplican 2 capas de película plástica con el mismo procedimiento que las anteriores. finalizado esto se pasa a la siguiente fase constructiva.

b) *Fabricación de la pieza:*

- Se colocan tres capas de Gel coat sobre el área trabajada, cuidando que la capa previa se encuentre seca antes de aplicar la siguiente.
- Se aplica una capa de fibra de vidrio. Este material tiene dos presentaciones comerciales: en filamentos o comprimida, en este caso se empleó el segundo.
- Se pone una capa de tela coremat. Esta le proporciona mayor grosor a la pieza y la hace más fuerte.
- Se aplica una última capa de fibra de vidrio. Concluido este proceso se deja secar la pieza por lo menos tres horas antes iniciar la creación de un segundo fragmento.
- A cada fragmento a elaborar se le aplica todo el proceso ya descrito. Antes de continuar, el molde primario debe encontrarse completamente seco y cubierto por las piezas del molde secundario.

c) *Secado y desmoldado.*

- Después de finalizar la elaboración del ultimo fragmento del molde secundario, es recomendable esperar al menos diez horas antes de iniciar el proceso de desmolde.
- El desmolde se realiza preferentemente utilizando cuñas plásticas y un martillo de goma. Con ellos se golpean las uniones del molde primario con los fragmentos, así como las juntas entre ellas. El objetivo es separar cada pieza de fibra de vidrio, sin dañarlas.



**Imagen 3.- Moldes secundario de fibra de vidrio en proceso de secado.** Fotografía de elaboración propia.

- Cuando todas las piezas de fibra de vidrio son separadas del molde primario, este cumple con su función y ya no se requiere para futuros procesos.

Con todo este proceso descrito, se generaron los moldes secundarios, sin embargo, el proceso para la fabricación de las piezas finales es prácticamente el mismo. La única diferencia es que en este primer ciclo constructivo, todo el proceso se llevó a cabo sobre las caras exteriores del molde primario de madera; mientras que para realizar las piezas finales, el proceso se lleva a cabo en las caras internas del molde secundario.

Los moldes secundarios se pueden emplear para crear de tres a seis piezas finales antes de comenzar a agrietarse por el uso. Todo este proceso constructivo fue el que se siguió para crear cada una de las seis piezas de fibra de vidrio que se ocuparon para la creación de los prototipos de humedales artificiales elevados.



**Imagen 4.- Módulos de maceta-humedal ya terminados.** Fotografía de elaboración propia.

## ANEXO B: Formulas empleadas para el cálculo de SST, SSV y SSF

En la prueba de evaporación:

1.- Para el cálculo del contenido de sólidos totales de las muestras empleadas se utiliza la siguiente formula:

$$ST = (G1 - G) * 1\ 000 / V$$

Donde:

ST son los sólidos totales, en mg/L;

G1 es el peso de la cápsula con el residuo, después de la evaporación, en mg;

G es el peso de la cápsula vacía, en mg a peso constante, y

V es el volumen de muestra, en mL

2.- El cálculo del contenido de sólidos totales volátiles de la muestra se calcula con base en la siguiente expresión:

$$SVT = (G1 - G2) * 1\ 000 / V$$

Donde:

SVT es la materia orgánica total, en mg/L;

G2 es el peso de la cápsula con el residuo, después de la calcinación, en mg

V es el volumen de muestra, en mL

En la prueba de filtración con microfibras:

3.- Para calcular el contenido de sólidos suspendidos totales de las muestras se realiza con:

$$SST = (G4 - G3) * 1\ 000 / V$$

Donde:

SST son los sólidos suspendidos totales, en mg/L;

G3 es el peso del crisol con el disco a peso constante, en mg;

G4 es el peso del crisol con el disco y el residuo seco, en mg, y

V es el volumen de muestra, en mL

4.- Para el cálculo del contenido de sólidos suspendidos volátiles de las muestras se utiliza la siguiente expresión:

$$SST = (G4 - G5) * 1\ 000 / V$$

Donde:

SST son los sólidos suspendidos totales, en mg/L;

G5 es el peso del crisol con el residuo, después de la calcinación, en mg;

V es el volumen de muestra, en mL.

5.- Para generar el cálculo del contenido de sales disueltas totales de las muestras se usa la siguiente formula:

$$SDT = ST - SST$$

Donde:

SDT son las sales disueltas totales, en mg/L

ST son los sólidos totales, en mg/L

SST son los sólidos suspendidos totales, en mg/L

Nota: Todos los resultados se obtuvieron en mL

## ANEXO C:

En la siguiente tabla, el período comprendido entre la muestra 1 y 11 no se consideró para realizar el gráfico mostrado en el subcapítulo de resultados, al no cumplir con todas las muestras.

<b>Resultados de los exámenes de DQO realizados a las muestras de agua</b>				
<b>No. Muestra</b>	<b>Entrada (mg/L)</b>	<b>Salida (mg/L)</b>		
		<b>Tezontle</b>	<b>Agrolita</b>	<b>Tepojal</b>
1	283			
2	303			
3	291			
4	292			
5	302			
6	309			
7	295			
8	297			
9	313			
10	265			
11	257			
12	288	82	61	43
13	264			
14	282	72	56	37
15	284			
16	289	63	59	42
17	330	54	38	32
18	295	62	56	40
19	307	54	37	31
20	262	46	42	25
21	251	51	34	30
22	329	82	21	32
23	334	37	165	32
24	310	58	165	32
25	319	59	204	43
26	315	46	188	19
27	316	68	128	39
28	295	68	191	37
29	289	61	166	40
30	288	58	184	47
31	280	59	192	65
32	327	62	193	64
33	275	35	129	55
34	336	28	36	39

Tabla de elaboración propia.

## ANEXO D:

<b>Resultados de la prueba de Nitrógeno amoniacal</b>				
<b>Número muestra</b>	<b>Entrada (mg/L)</b>	<b>Salida (mg/L)</b>		
		<b>Tezontle</b>	<b>Agrolita</b>	<b>Tepojal</b>
1		5.00	0.155	3.63
2		5.52	0.198	3.14
3		4.52	0.159	3.49
4		2.72	0.601	2.71
5		3.51	0.622	2.18
6	21.00	2.36	0.26	2.30
7	13.70	3.37	2.04	2.37
8	16.10	3.32	1.12	3.72
9	18.30	4.31	0.828	4.45
10	20.50	4.92	4.74	4.95
11	24.30	6.78	5.68	7.19
12	21.90	7.67	8.36	7.57
13	21.10	8.92	10.30	8.16
14	19.80	7.74	11.30	10.80
15	24.00	5.12	6.12	6.06

Tabla de elaboración propia.

En la tabla anterior, durante el período conferido desde la muestra 1 a la 5, no se realizó la prueba a las muestras de agua de ingreso, por lo que la gráfica mostrada en los resultados se basó en los resultados de las muestras 6 a la 15.

En la siguiente relación, los resultados de la determinación del Nitrito utilizados como base para la gráfica mostrada en el apartado de resultados, fueron aquellos comprendidos entre la muestra seis y la doce.

<b>Resultados de la determinación de nitrito en las muestras</b>				
<b>Número muestra</b>	<b>Entrada (mg/L)</b>	<b>Salida (mg/L)</b>		
		<b>Tezontle</b>	<b>Agrolita</b>	<b>Tepojal</b>
1		0.006	0.009	0.004
2		0.010	0.014	0.010
3		0.009	0.014	0.009
4		0.011	0.036	0.006
5		0.012	0.013	0.016
6	0.098	0.020	0.042	0.028
7	0.106	0.026	0.043	0.021
8	0.133	0.015	0.042	0.013
9	0.120	0.014	0.038	0.010

10	0.096	0.015	0.026	0.007
11	0.097	0.013	0.033	0.002
12	0.104	0.017	0.034	0.017

Tabla de elaboración propia.

La gráfica que se mostró en el apartado de resultados en base a la siguiente tabla, tomó en consideración únicamente el ciclo comprendido entre la muestra seis y la quince.

<b>Resultados de la prueba de Nitratos</b>				
		<b>Salida (mg/L)</b>		
<b>Número muestra</b>	<b>Entrada (mg/L)</b>	<b>Tezontle</b>	<b>Agrolita</b>	<b>tepojal</b>
1		1.60	1.60	1.50
2		2.00	1.60	1.70
3		1.30	1.20	1.30
4		1.20	1.20	1.20
5		2.00	1.80	1.50
6	1.90	1.20	1.30	1.20
7	2.30	1.30	1.10	1.10
8	1.80	1.10	1.20	1.20
9	1.30	1.30	1.00	1.20
10	1.30	1.10	1.70	1.30
11	1.50	1.50	1.20	1.10
12	1.40	1.20	1.00	1.00
13	1.40	1.10	1.10	1.20
14	1.50	1.40	1.40	1.10
15	1.80	3.90	2.50	1.40

Tabla de elaboración propia.

Para la determinación del Nitrógeno total, se realizó una sumatoria de los anteriores tres compuestos nitrogenados; en la tabla siguiente se puede apreciar tanto el procedimiento como los resultados. Se utilizó para la realización del gráfico mostrado en los resultados, el rango conformado desde la muestra seis a la doce.

<b>Sumatoria y resultados de la determinación del nitrógeno total presente en las muestras</b>																
	<b>AMONIACO</b>				<b>NITRITO</b>				<b>NITRATO</b>				<b>Nitrógeno Total</b>			
<b>Número muestra</b>	<b>Entrada (mg/L)</b>	<b>Salida (mg/L)</b>			<b>Entrada (mg/L)</b>	<b>Salida (mg/L)</b>			<b>Entrada (mg/L)</b>	<b>Salida (mg/L)</b>			<b>Entrada (mg/L)</b>	<b>Salida (mg/L)</b>		
		<b>Tezontle</b>	<b>Agrolita</b>	<b>Tepojal</b>		<b>Tezontle</b>	<b>Agrolita</b>	<b>tepojal</b>		<b>Tezontle</b>	<b>Agrolita</b>	<b>tepojal</b>		<b>Tezontle</b>	<b>Agrolita</b>	<b>tepojal</b>
1		5.00	0.155	3.63		0.006	0.009	0.004		1.60	1.600	1.50		6.606	1.764	5.134
2		5.52	0.198	3.14		0.632	0.014	0.010		2.00	1.600	1.70		8.152	1.812	4.850
3		4.52	0.159	3.49		0.009	0.014	0.009		1.30	1.200	1.30		5.829	1.373	4.799
4		2.72	0.601	2.71		0.011	0.036	0.006		1.20	1.200	1.20		3.931	1.837	3.916
5		3.51	0.622	2.18		0.449	0.013	0.016		2.00	1.800	1.50		5.959	2.435	3.696
6	21.00	2.36	0.26	2.30	0.098	0.020	0.042	0.028	1.90	1.20	1.30	1.20	22.998	3.580	1.600	3.528
7	13.70	3.37	2.04	2.37	0.106	0.026	0.043	0.021	2.30	1.30	1.10	1.10	16.106	4.696	3.183	3.491
8	16.10	3.32	1.12	3.72	0.133	0.015	0.042	0.013	1.80	1.10	1.20	1.20	18.033	4.435	2.362	4.933
9	18.30	4.31	0.828	4.45	0.120	0.014	0.038	0.010	1.30	1.30	1.00	1.20	19.720	5.624	1.866	5.660
10	20.50	4.92	4.74	4.95	0.096	0.015	0.026	0.007	1.30	1.10	1.70	1.30	21.896	6.035	6.466	6.257
11	24.30	6.78	5.68	7.19	0.097	0.013	0.033	0.002	1.50	1.50	1.20	1.10	25.897	8.293	6.913	8.292
12	21.90	7.67	8.36	7.57	0.104	0.017	0.034	0.017	1.40	1.20	1.00	1.00	23.404	8.887	9.394	8.587

Tabla de elaboración propia.

## ANEXO E:

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos del examen de determinación de fósforo total y fosfatos. Cabe recalcar, dado que en la realización de esta prueba se utilizó un agua conformada por 1.0 mL de agua muestra y 9.0 de agua destilada, los resultados obtenidos de esta, fueron multiplicados por 9 a fin de obtener el resultado real de la cantidad de contaminantes presentes en 10 mL de agua muestra. Para la elaboración de las gráficas mostradas en el apartado de resultados, se empleó como base el ciclo desarrollado desde la muestra seis a la quince de ambas tablas.

<b>Resultados de la determinación de Fósforo Total</b>								
<b>Número muestra</b>	<b>Resultados lectura colorímetro (mg/L)</b>				<b>Resultados aplicados (RLC x 9) (mg/L)</b>			
	<b>Tezontle</b>	<b>Agrolita</b>	<b>tepojal</b>	<b>Entrada</b>	<b>Tezontle</b>	<b>Agrolita</b>	<b>tepojal</b>	<b>Entrada</b>
1	0.43	0.330	0.40		3.870	2.970	3.600	
2	0.34	0.280	0.51		3.060	2.520	4.590	
3	0.23	0.310	0.57		2.070	2.790	5.130	
4	0.45	0.380	0.56		4.050	3.420	5.040	
5	0.44	0.490	0.49		3.960	4.410	4.410	
6	0.40	0.51	0.57	0.44	3.600	4.590	5.130	3.960
7	0.40	0.60	0.54	0.40	3.600	5.400	4.860	3.600
8	0.52	0.45	0.55	0.58	4.680	4.050	4.950	5.220
9	0.42	0.48	0.57	0.67	3.780	4.320	5.130	6.030
10	0.56	0.54	0.43	0.68	5.040	4.860	3.870	6.120
11	0.54	0.56	0.49	0.66	4.860	5.040	4.410	5.940
12	0.55	0.56	0.52	0.60	4.950	5.040	4.680	5.400
13	0.49	0.61	0.49	0.54	4.410	5.490	4.410	4.860
14	0.45	0.59	0.52	0.49	4.050	5.310	4.680	4.410
15	0.47	0.53	0.50	0.66	4.230	4.770	4.500	5.940

Tabla de elaboración propia.

<b>Tabla de determinación de Fosfatos presentes en las muestras</b>								
<b>Número muestra</b>	<b>Resultados lectura colorímetro (mg/L)</b>				<b>Resultados aplicados (RLC x 9) (mg/L)</b>			
	<b>Tezontle</b>	<b>Agrolita</b>	<b>tepojal</b>	<b>Entrada</b>	<b>Tezontle</b>	<b>Agrolita</b>	<b>tepojal</b>	<b>Entrada</b>
1	1.32	1.000	1.23		11.880	9.000	11.053	
2	1.03	0.86	1.57		9.270	7.737	14.130	
3	0.71	0.940	1.75		6.355	8.460	15.750	
4	1.37	1.150	1.72		12.330	10.350	15.474	
5	1.36	1.50	1.49		12.240	13.539	13.410	
6	1.23	1.58	1.75	1.33	11.070	14.220	15.750	11.970
7	1.23	1.85	1.67	1.24	11.070	16.650	15.030	11.160
8	1.61	1.39	1.69	1.78	14.490	12.510	15.210	16.020
9	1.28	1.49	1.74	2.04	11.520	13.410	15.660	18.360
10	1.61	1.62	1.28	2.09	14.490	14.580	11.520	18.810
11	1.71	1.66	1.47	2.03	15.390	14.940	13.230	18.270
12	1.79	1.77	1.59	1.90	16.110	15.930	14.310	17.100
13	1.50	1.92	1.85	1.66	13.500	17.280	16.650	14.940
14	1.31	1.85	1.65	1.51	11.790	16.650	14.850	13.590
15	1.45	1.56	1.53	2.02	13.050	14.040	13.770	18.180

Tabla de elaboración propia.

## ANEXO F:

Para lograr la determinación de la cantidad de Sulfatos presentes en el agua antes de entrar y tras salir de los módulos de humedales artificiales, se empleó para la ejecución de la prueba correspondiente, una proporción de agua conformada por 1.0 mL de agua muestra y 9.0 mL de agua destilada. Por este motivo, para determinar la cantidad de contaminante presente en una muestra de 10.0 mL de agua muestra, es necesario realizar una multiplicación por nueve de los resultados obtenidos originalmente en las lecturas del colorímetro.

Por otra parte, para la generación de la gráfica mostrada en el apartado de resultados correspondiente a este tema, se utilizó como base la información presentada en la siguiente tabla desde la muestra seis a la quince.

<b>Cantidades de Sulfatos presentes en las muestras de agua</b>								
<b>Número muestra</b>	<b>Resultados lectura colorímetro (mg/L)</b>				<b>Resultados aplicados (RLC x 9) (mg/L)</b>			
	<b>Tezontle</b>	<b>Agrolita</b>	<b>tepojal</b>	<b>Entrada</b>	<b>Tezontle</b>	<b>Agrolita</b>	<b>tepojal</b>	<b>Entrada</b>
1	1.0	23.0	8.0		9	207	72	
2	17.0	24.0	8.0		153	216	72	
3	26.0	26.0	17.0		234	234	153	
4	21.0	32.0	29.0		189	288	261	
5	17.0	34.0	15.0		153	306	135	
6	31.0	33.0	27.0	31.0	279	297	243	279
7	19.0	26.0	15.0	17.0	171	234	135	153
8	7.0	12.0	8.0	14.0	63	108	72	126
9	14.0	16.0	14.0	20.0	126	144	126	180
10	2.0	16.0	4.0	13.0	18	144	36	117
11	3.0	7.0	7.0	7.0	27	63	63	63
12	1.3	4.0	5.0	8.0	12	36	45	72
13	1.0	4.0	9.0	13.0	9	36	81	117
14	4.0	6.0	2.0	18.0	36	54	18	162
15	5.0	8.0	10.0	19.0	45	72	90	171

Tabla de elaboración propia.

## ANEXO G:

En la siguiente tabla se pueden apreciar los resultados numéricos obtenidos en la prueba realizada para la determinación de Sólidos Suspendidos Totales por diferencias gravimétricas por proceso de evaporación.

<b>Tabla de resultados de la determinación de Sólidos Suspendidos Totales por el método de la evaporación</b>										
<b>Tipo Muestra</b>	<b>Fecha</b>	<b>Peso inicial de la capsula</b>	<b>Peso Final de la capsula</b>	<b>Porcentaje de aumento</b>	<b>SST (mg/L)</b>	<b>Peso después del calcinado</b>	<b>SVT (mg/L)</b>	<b>SSF (mg/L)</b>	<b>Porcentaje de SVT</b>	<b>Porcentaje de SSF</b>
Alimentación	20-jun	36.6363	36.6629	0.02	1330	36.6544	425.0000	905.0000	31.9549	68.0451
	27-jun	23.6554	23.6765	0.015	1407	23.6691	493.3333	913.3333	35.0711	64.9289
	18-ago	36.6369	36.6574	0.015	1367	36.6507	446.6667	920.0000	32.6829	67.3171
	19-ago	24.6430	24.6647	0.015	1447	24.6564	553.3333	893.3333	38.2488	61.7512
	22-ago	24.2013	24.2219	0.015	1373	24.2143	506.6667	866.6667	36.8932	63.1068
<b>Resultados en agua de alimentación</b>					<b>1385</b>		<b>485.0000</b>	<b>899.6667</b>	<b>34.9702</b>	<b>65.0298</b>
Agrolita	20-jun	23.7549	23.7733	0.015	1227	23.7696	246.6667	980.0000	20.1087	79.8913
	27-jun	24.6431	24.6611	0.015	1200	24.6565	306.6667	893.3333	25.5556	74.4444
	18-ago	23.6558	23.6772	0.015	1427	23.6707	433.3333	993.3333	30.3738	69.6262
	19-ago	24.3282	24.3547	0.015	1767	24.3446	673.3333	1093.3333	38.1132	61.8868
	22-ago	23.7549	23.7815	0.015	1773	23.7723	613.3333	1160.0000	34.5865	65.4135
<b>Resultados agua tratada por H.A. con sustrato de Agrolita</b>					<b>1479</b>		<b>454.6667</b>	<b>1024.0000</b>	<b>29.7476</b>	<b>70.2524</b>
Tezontle	20-jun	25.6046	25.6213	0.015	1113	25.6186	180.0000	933.3333	16.1677	83.8323
	27-jun	24.2011	24.2211	0.015	1333	24.2158	353.3333	980.0000	26.5000	73.5000
	18-ago	23.7555	23.7766	0.015	1407	23.7709	380.0000	1026.6667	27.0142	72.9858
	19-ago	24.2015	24.223	0.015	1433	24.2168	413.3333	1020.0000	28.8372	71.1628
	22-ago	23.6558	23.6755	0.015	1313	23.671	300.0000	1013.3333	22.8426	77.1574
<b>Resultados agua tratada por H.A. con sustrato de Tezontle</b>					<b>1320</b>		<b>325.3333</b>	<b>994.6667</b>	<b>24.2723</b>	<b>75.7277</b>
Tepojal	20-jun	32.9336	32.9587	0.02	1255	32.9542	225.0000	1030.0000	17.9283	82.0717

	27-jun	24.3277	24.3469	0.015	1280	24.3424	300.0000	980.0000	23.4375	76.5625
	18-ago	32.9342	32.9656	0.02	1570	32.9567	445.0000	1125.0000	28.3439	71.6561
	19-ago	25.6053	25.6307	0.015	1693	25.6225	546.6667	1146.6667	32.2835	67.7165
	22-ago	24.3282	24.3509	0.015	1513	24.3439	466.6667	1046.6667	30.8370	69.1630
Resultados agua tratada por H.A. con sustrato de Tepojal					1462		396.6667	1065.6667	26.5660	73.4340

Tabla de elaboración propia.

Por otra parte, los siguientes son los resultados obtenidos a través del método de la infiltración a través de crisoles Gooch.

<b>Determinación de la cantidad SST, SVT y SSF presentes en las muestras, usando el metodo de la infiltración</b>										
<b>Tipo Muestra</b>	<b>Fecha</b>	<b>Peso inicial del Gooch</b>	<b>Peso Evapor del Gooch</b>	<b>Volumen de muestra</b>	<b>SST</b>	<b>Peso después del calcinado</b>	<b>SSV (mg/L)</b>	<b>SSF (mg/L)</b>	<b>Porcentaje de SVT</b>	<b>Porcentaje de SSF</b>
Alimentación	18-ago	38.4930	38.4959	0.052	55.77	38.4935	46.15	9.62	82.76	17.24
	19-ago	23.1350	23.1369	0.050	38.00	23.135	38.00	0.00	100.00	0.00
	22-ago	36.8467	36.849	0.050	46.00	36.8467	46.00	0.00	100.00	0.00
<b>Resultados en agua de alimentación</b>					<b>46.59</b>		<b>43.38</b>	<b>3.21</b>	<b>94.25</b>	<b>5.75</b>
Agrolita	18-ago	15.5374	15.5380	0.050	12.00	15.5377	6.00	6.00	50.00	50.00
	19-ago	22.0876	22.0882	0.050	12.00	22.0877	10.00	2.00	83.33	16.67
	22-ago	25.4368	25.4373	0.050	10.00	25.4368	10.00	0.00	100.00	0.00
<b>Resultados agua tratada por H.A. con sustrato de Agrolita</b>					<b>11.33</b>		<b>8.67</b>	<b>2.67</b>	<b>77.78</b>	<b>22.22</b>
Tezontle	18-ago	25.4362	25.4367	0.055	9.09	25.4365	3.64	5.45	40.00	60.00
	19-ago	15.5374	15.5379	0.055	9.09	15.5375	7.27	1.82	80.00	20.00
	22-ago	23.1361	23.1365	0.050	8.00	23.1362	6.00	2.00	75.00	25.00
<b>Resultados agua tratada por H.A. con sustrato de Tezontle</b>					<b>8.73</b>		<b>5.64</b>	<b>3.09</b>	<b>65.00</b>	<b>35.00</b>
Tepojal	18-ago	16.5428	16.5430	0.050	4.00	16.5428	4.00	0.00	100.00	0.00
	19-ago	22.0881	22.0883	0.055	3.64	22.0881	3.64	0.00	100.00	0.00
	22-ago	16.5436	16.5439	0.050	6.00	16.5437	4.00	2.00	66.67	33.33
<b>Resultados agua tratada por H.A. con sustrato de Tepojal</b>					<b>4.55</b>		<b>3.88</b>	<b>0.67</b>	<b>88.89</b>	<b>11.11</b>

Tabla de elaboración propia.

## Anexo H:

<b>Tabla de las cantidades de pH presente en las muestras de agua</b>				
<b>Número muestra</b>	<b>Alimentación</b>	<b>Salida</b>		
		<b>Tezontle</b>	<b>Agrolita</b>	<b>Tepojal</b>
1	6.59	7.21	6.83	7.44
2	6.51	7.33	7.31	7.35
3	6.61	7.05	6.89	7.33
4	7.19	7.48	7.37	7.32
5	6.44	6.90	6.57	6.68
6	6.67	6.90	6.91	6.90
7	6.48	6.90	6.62	6.90
8	6.35	6.89	6.43	6.58
9	6.52	6.89	6.48	6.75
10	6.57	6.71	6.53	6.98
11	6.62	6.52	6.38	6.38

Tabla de elaboración propia.

## Anexo I:

<b>Resultados del cálculo del porcentaje de porosidad de los sustratos empleados</b>			
<b>Material</b>	<b>Agua agregada (mL)</b>	<b>Volumen Total sustrato</b>	<b>Porcentaje Porosidad</b>
Agrolita	58.00	100	58%
Tepojal	51.00	100	51%
Tezontle	77.00	100	77%

Tabla de elaboración propia.

<b>Cálculo del porcentaje de humedad de los sustratos empleados</b>			
<b>Tipo de muestreo</b>	<b>Pesos por sustratos (gramos)</b>		
	<b>Agrolita</b>	<b>Tepojal</b>	<b>Tezontle</b>
Vaso precipitado vacío	52.4512	51.7437	53.0795
Material Agregado a cada vaso	5.1088	13.6163	18.2965
Agua agregada a cada vaso	23.0400	19.009	28.3600
Material Saturado de agua	74.2460	69.4320	78.5445
Material completamente seco y constante	57.5315	64.9136	71.0140
<b>Porcentaje de humedad calculado (%)</b>	<b>29.0528</b>	<b>6.9606</b>	<b>10.6042</b>

Tabla de elaboración propia.

## Anexo J:

En la siguiente tabla se aprecian tanto los minutos como las distancias utilizadas para realizar el cálculo de las velocidades que se presentaron dentro de los módulos de humedales artificiales.

<b>Tabla de resultados de la determinación de la velocidad interna del agua en los humedales artificiales</b>									
<b>Primera prueba</b>									
<b>Material</b>	<b>Tipo de medida</b>	<b>Cantidad de tiempo (min)</b>		<b>Segundos</b>	<b>Cantidad de tiempo (seg)</b>		<b>Distancia</b>	<b>Velocidad m/s</b>	
		<b>0.5 litros</b>	<b>1 litro</b>		<b>0.5 litros</b>	<b>1 litro</b>		<b>0.5 litros</b>	<b>1 litro</b>
Tezontle	<i>Alimentación</i>	34	66	60	2040	3960	0.67	0.000328431	0.000169192
	<i>Salida</i>	11	40	60	660	2400	0.67	0.001015152	0.000279167
Agrolita	<i>Alimentación</i>	31	62	60	1860	3720	0.67	0.000360215	0.000180108
	<i>Salida</i>	27	75	60	1620	4500	0.67	0.00041358	0.000148889
Tepojal	<i>Alimentación</i>	31	61	60	1860	3660	0.67	0.000360215	0.00018306
	<i>Salida</i>	7	16	60	420	960	0.67	0.001595238	0.000697917
<b>Segunda prueba</b>									
Tezontle	<i>Alimentación</i>	18	36	60	1080	2160	0.67	0.00062037	0.000310185
	<i>Salida</i>	8	21	60	480	1260	0.67	0.001395833	0.000531746
Agrolita	<i>Alimentación</i>	13	28	60	780	1680	0.67	0.000858974	0.00039881
	<i>Salida</i>	12	31	60	720	1860	0.67	0.000930556	0.000360215
Tepojal	<i>Alimentación</i>	23	46	60	1380	2760	0.67	0.000485507	0.000242754
	<i>Salida</i>	9	20	60	540	1200	0.67	0.001240741	0.000558333

Tabla de elaboración propia.

## Anexo K:

Para determinar la cantidad de precipitación que se presenta en la Facultad de Estudios Superiores Aragón fue necesario primeramente realizar el mapa con el polígono de trabajo y las curvas de nivel, tal y como se describió en el apartado de procedimiento. Una imagen de este se muestra a continuación.

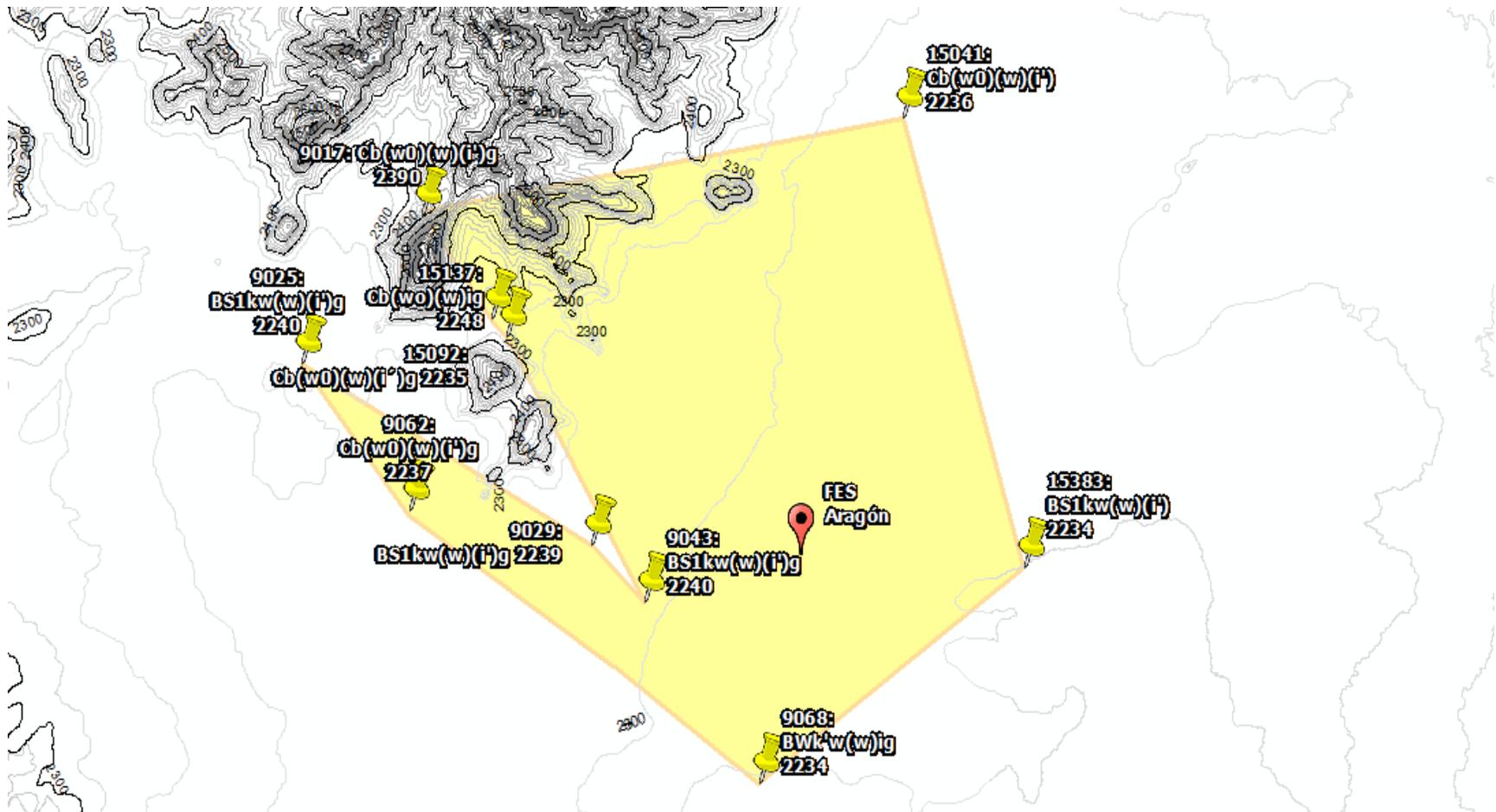


Imagen 5.- Plano topográfico con curvas de nivel a cada 20 metros de altitud; incluye polígono de estaciones meteorológicas. Imagen de elaboración propia.

.- Promedio climáticos de la estación meteorológica y cálculo del tipo de clima presente en FES Aragón																			
Estación	Altitud	Coord.	Ene.	Feb.	Mar.	Abril	Mayo	Jun.	Jul.	Ago.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.	Anual	P/T	% P. Inv.	Osc.	Tipo de clima
San Juan de Aragón	2240	19°27'55"	13.6	15.7	17.8	19.5	20.1	19.9	18.8	18.9	18.7	17.4	15.5	13.9	17.5	34.82	4.99	6.5	BS1kw(w)(i)g
		99°04'45"	5.8	11.4	13.2	25.3	42.3	118.3	126.4	111.7	91.6	47.7	10.8	4.8	609.3				

Determinación de la precipitación diaria en el área de estudio, FES Aragón													
	Ene.	Feb.	Mar.	Abril	Mayo	Jun.	Jul.	Ago.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.	
Precipitación mensual	5.8	11.4	13.2	25.3	42.3	118.3	126.4	111.7	91.6	47.7	10.8	4.8	
Cantidad de Lluvia	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	
<b>Precipitación diaria</b>	<b>0.19</b>	<b>0.41</b>	<b>0.43</b>	<b>0.84</b>	<b>1.36</b>	<b>3.94</b>	<b>4.08</b>	<b>3.60</b>	<b>3.05</b>	<b>1.54</b>	<b>0.36</b>	<b>0.15</b>	

$\text{Área de captación (m}^2\text{)} = \text{Área cara superior módulos humedales artificiales} = 0.21 * 0.40 = 0.084 \text{ m}^2$ .

Determinación de litros de precipitación diaria que cosechado en cada módulo de humedal artificial					
Mes	Cantidad de lluvia por día (mm)	Área de captación (m <sup>2</sup> )	Precipitación (mm/m <sup>2</sup> )	Precipitación captada (mm)	Precipitación captada (L)
enero	0.19	0.084	0.00019	0.00001596	0.016
febrero	0.41	0.084	0.00041	0.00003444	0.034
marzo	0.43	0.084	0.00043	0.00003612	0.036
abril	0.84	0.084	0.00084	0.00007056	0.071
mayo	1.36	0.084	0.00136	0.00011424	0.114
junio	3.94	0.084	0.00394	0.00033096	0.331
julio	4.08	0.084	0.00408	0.00034272	0.343
agosto	3.6	0.084	0.0036	0.0003024	0.302
septiembre	3.05	0.084	0.00305	0.0002562	0.256
octubre	1.54	0.084	0.00154	0.00012936	0.129
noviembre	0.36	0.084	0.00036	0.00003024	0.030
diciembre	0.15	0.084	0.00015	0.0000126	0.013

Tablas de elaboración propia.

## Anexo L:

<b>Resultados de la recolección de agua tratada que producida por los prototipos</b>				
<b>Numero muestreo</b>	<b>Fecha</b>	<b>Salida de agua (L)</b>		
		<b>Tezontle</b>	<b>Agrolita</b>	<b>Tepojal</b>
1	06/05/16	0.95	0.70	1.23
2	11/05/16	0.20	0.12	0.30
3	12/05/16	1.34	1.27	1.86
4	13/05/16	0.75	0.98	1.01
5	16/05/16	0.42	0.28	0.88
6	17/05/16	0.80	0.40	0.48
7	18/05/16	0.40	0.40	0.40
8	19/05/16	1.10	0.48	0.70
9	20/05/16	0.28	0.26	1.30
10	23/05/16	0.26	0.20	0.40
11	26/05/16	1.10	0.50	1.35
12	27/05/16	0.42	0.52	1.10
13	30/05/16	1.35	0.51	1.35
14	01/06/16	0.28	0.50	1.38
15	03/06/16	0.10	0.70	1.48
16	06/06/16	1.10	1.73	1.25
17	07/06/16	2.24	3.00	2.71
18	09/06/16	2.86	2.91	3.84
19	10/06/16	3.56	3.80	3.06
20	13/06/16	2.24	3.25	2.08
21	15/06/16	3.69	2.72	3.11
22	16/06/16	4.14	3.11	2.93
23	17/06/16	3.35	3.40	1.27
24	20/06/16	3.27	3.60	3.09
25	21/06/16	4.02	4.15	4.18
26	22/06/16	4.97	4.81	4.57
27	23/06/16	1.60	2.10	1.25
28	24/06/16	0.85	0.71	1.18
29	27/06/16	1.64	3.62	4.27
30	28/06/16	2.10	3.12	2.96
31	29/06/16	2.35	4.17	3.15
32	30/06/16	5.17	4.90	6.32
33	01/07/16	2.36	3.19	2.95
34	18/08/16	3.20	2.25	3.60
35	19/08/16	3.45	2.45	2.67
<b>Promedio agua tratada al día</b>		<b>1.89</b>	<b>1.98</b>	<b>2.13</b>

Tabla de elaboración propia

## Anexo M:

<b>Tabla de diferencias térmicas registradas entre los perímetros y centros de los humedales artificiales con respecto a la temperatura de la loza</b>								
<b>Fecha</b>	<b>Hora</b>	<b>Temperatura (°C)</b>						<b>superficial de loza</b>
		<b>Tezontle</b>		<b>Agrolita</b>		<b>Tepojal</b>		
		<i>Orilla maceta</i>	<i>Planta</i>	<i>Orilla maceta</i>	<i>Planta</i>	<i>Orilla maceta</i>	<i>Planta</i>	
02-may	11:30	35.9	35.8	35.4	35.3	35.5	34.9	36.3
03-may	14:32	33.3	33.1	32.3	32	32.6	32.4	31.5
04-may	10:34	25.1	24.9	25.1	24.8	25.6	25.1	26.4
05-may	11:53	29.5	29.2	30.1	29.7	29.9	29.8	29.5
12-may	12:30	31.6	31.5	31.5	31.4	30.8	30.5	31.1
13-may	11:00	29.7	29.4	30.5	29.2	30.2	29.8	30.7
16-may	09:20	21.9	21.8	22.1	22.0	22.5	22.3	22.0
17-may	14:45	30.7	30.5	30.6	30.5	30.6	30.5	30.1
19-may	10:45	29.3	29.1	30.0	29.5	30.1	29.6	29.9
20-may	10:15	27.3	26.8	27.0	26.5	27.0	26.8	27.1
27-may	12:00	29.3	29.1	31.2	30.8	31.1	31.0	30.8
30-may	10:40	24.1	24.0	24.1	23.6	24.5	24.2	24.6
01-jun	11:10	23.5	23.1	23.5	23.0	23.7	23.4	23.7
07-jun	12:45	29.0	28.8	28.0	27.8	28.5	28.3	28.6
09-jun	11:00	22.1	22	22.2	22.1	22.1	21.8	22.2
10-jun	12:30	32.1	31.8	31.1	30.9	31.0	30.5	30.9
20-jun	09:30	21.4	21.1	21.1	21.1	21.1	21.0	21.7
22-jun	10:45	23.5	23.2	22.6	22.5	23.0	22.8	24.2
23-jun	11:10	20.8	20.3	20.2	19.8	20.4	20.3	20.3
23-jun	14:40	26.8	26.0	26.8	26.2	26.6	26.1	27.1
24-jun	13:30	31.0	31.0	30.7	29.5	30.9	30.5	31.3
28-jun	11:00	24.0	23.9	23.2	23.0	23.3	22.9	23.6
28-jun	12:20	26.6	26.5	26.1	25.7	25.9	25.6	27.0
29-jun	12:45	28.0	27.7	28.0	27.5	26.8	26.3	27.5
30-jun	12:40	22.5	22.3	22.8	22.7	22.5	22.3	23.7
15-ago	12:55	24.6	24.8	25.1	25	25.3	24.6	24.6
16-ago	13:20	27.5	27.1	26.9	26.5	26.5	26.0	27.1
17-ago	11:20	23.3	23.0	23.2	22.7	22.8	22.6	23.4
18-ago	11:30	25.4	25.1	25.3	25.0	24.2	24.0	24.8
19-ago	11:50	25.3	25.0	24.9	24.5	24.8	24.1	24.7
<b>Promedios</b>		<b>26.84</b>	<b>26.60</b>	<b>26.72</b>	<b>26.36</b>	<b>26.66</b>	<b>26.33</b>	<b>26.88</b>

Tabla de elaboración propia.

<b>Diferencias térmicas entre la superficie de la loza y debajo de los prototipos</b>					
<b>Fecha</b>	<b>Hora</b>	<b>Temperatura (°C) bajo macetas</b>			<b>Temperatura superficial de loza (°C)</b>
		<b>Tezontle</b>	<b>Agrolita</b>	<b>Tepojal</b>	
02-may	11:40	32.1	32.3	32.5	36.3
03-may	14:42	27.9	27.6	27.6	31.5
04-may	10:44	24.0	24.3	24.1	26.4
05-may	12:10	27.2	27.1	27.1	29.5
12-may	13:00	29.3	29.6	29.5	31.1
13-may	11:15	28.6	28.8	28.5	30.7
16-may	09:35	20.6	20.5	20.5	22.0
17-may	15:00	27.7	27.5	27.3	30.1
19-may	11:00	28.0	27.8	27.5	29.9
20-may	10:30	24.9	25.0	24.8	27.1
27-may	12:15	28.1	28.3	28.4	30.8
30-may	10:20	23.3	23.5	23.6	24.6
01-jun	11:00	22.5	22.3	22.2	23.7
07-jun	12:30	25.4	25.3	25.0	28.6
09-jun	10:40	21.4	21.0	21.1	22.2
10-jun	12:17	27.5	27.3	27.0	30.9
17-jun	13:30	26.1	25.8	26.3	30.0
20-jun	09:10	19.0	19.5	19.1	21.7
22-jun	10:30	21.0	21.3	21.6	24.2
23-jun	11:00	18.7	18.8	18.7	20.3
23-jun	14:20	24.3	23.8	23.4	27.1
24-jun	13:15	28.4	28.3	29.1	31.3
28-jun	10:45	20.1	20.3	20.5	23.6
28-jun	12:10	24.7	24.8	24.3	27.0
29-jun	12:30	25.5	25.1	25.6	27.5
30-jun	12:30	21.5	21.3	20.9	23.7
15-ago	12:40	22.9	22.6	23.0	24.6
16-ago	13:10	25.4	25.3	24.8	27.1
17-ago	11:00	21.3	21.4	21.7	23.4
18-ago	11:10	22.1	23.6	23.1	24.8
19-ago	11:35	22.2	22.7	22.5	24.7
<b>Promedios</b>		<b>24.57</b>	<b>24.61</b>	<b>24.56</b>	<b>26.98</b>

. Tabla de elaboración propia.

## Anexo L:

$$\text{Área de los módulos: } 0.40 \times 0.21 \times 0.40 = 0.0336 \text{ m}^3$$

<b>Tabla de Cálculo del peso de cada uno de los prototipos de humedales artificiales</b>							
Materiales	Peso volumétrico (kg/m <sup>3</sup> )		Volumen módulos humedales (m <sup>3</sup> )	Peso prototipo p/p (kg)		5% de peso prototipo saturado (kg)	Peso prototipo saturado total (kg)
	Seco	Saturado		Seco	Saturado		
Tezontle	1250	1550	0.0336	42	52.08	2.604	54.684
Agrolita	104.1	504	0.0336	3.49776	16.9344	0.84672	17.78112
Tepojal	350	1100	0.0336	11.76	36.96	1.848	38.808

Tabla de elaboración propia.

La diferencia de pesos entre los sustratos hace que sus límites de instalación y rendimientos varíen y eso es lo que se desea probar con los siguientes casos. En un caso teórico donde el límite de carga permisible de una azotea para la instalación de este sistema es de 400 kg, la cantidad de módulos de humedales artificiales que se podrán instalar en la misma, serían:

<b>Cantidad de módulos de humedales artificiales instalables de acuerdo a la limitación de peso y el sustrato empleado</b>					
Materiales	Peso prototipo saturado total (kg)	limite (kg)	Cantidad de piezas instalables	Agua tratada por modulo (L*día)	Agua tratada por el sistema (L*día)
Tezontle	54.684	400	7	1.89	13.23
Agrolita	17.7811	400	22	1.98	43.56
Tepojal	38.808	400	10	2.13	21.3

Tabla de elaboración propia.

Ahora bien, en otro caso, si lo que se buscará es tratar 100 litros de agua al día, entonces, realizando un cálculo de la instalación necesaria para responder a esta demanda tenemos:

<b>Peso de la instalación de los humedales artificiales de acuerdo a una limitación de rendimiento</b>					
Materiales	Agua tratada por modulo (L*día)	Agua a tratar (L)	Módulos necesarios	Peso prototipo saturado total (kg)	Peso total de la instalación
Tezontle	1.89	100	53	54.684	2893.333333
Agrolita	1.98	100	51	17.7811	898.0353535
Tepojal	2.13	100	47	38.808	1821.971831

Tabla de elaboración propia.

Finalmente, toda esta información se utilizó como base para establecer las relaciones que se muestran en el apartado de resultados con respecto a este mismo tema.