



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN ARQUITECTURA

CAMPO DE CONOCIMIENTO: TECNOLOGÍA

La integración de Humedales Artificiales con Muros Verdes para contribuir al cumplimiento de la norma NMX-AA-164-SCFI-2013 y el PAAS.

Un sistema de tratamiento descentralizado de agua gris para la Vivienda de Interés Social

Tesis

Que para optar por el grado de:

MAESTRA EN ARQUITECTURA

Presenta

BEATRIZ ELVIRA GUZMÁN FLORES

Tutor: Mtro. Sergio Alfonso Martínez González
FES Aragón

Ciudad Nezahualcóyotl, Estado de México

Septiembre 2017



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.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN ARQUITECTURA

CAMPO DE CONOCIMIENTO: TECNOLOGÍA

La integración de Humedales Artificiales con Muros Verdes para contribuir al cumplimiento de la norma NMX-AA-164-SCFI-2013 y el PAAS.
Un sistema de tratamiento descentralizado de agua gris para la
Vivienda de Interés Social

Tesis

Que para optar por el grado de:

MAESTRA EN ARQUITECTURA

Presenta

BEATRIZ ELVIRA GUZMÁN FLORES

Tutor: Mtro. Sergio Alfonso Martínez González

Ciudad Nezahualcóyotl, Estado de México

Septiembre 2017



La integración de Humedales Artificiales con Muros Verdes para contribuir al cumplimiento de la norma NMX-AA-164-SCFI-2013 y el PAAS.
Un sistema de tratamiento descentralizado de agua gris para la Vivienda de Interés Social

Presenta
BEATRIZ ELVIRA GUZMÁN FLORES



INSTITUTO
DE INVESTIGACIONES
HISTÓRICAS





Tutor:

Mtro. 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 Arq. Ernesto Ocampo Ruiz (Arquitectura UNAM)

M. en I. Mario Sosa Rodríguez (Facultad de Estudios Superiores Aragón)



Agradecimientos

Agradezco y dedico este trabajo a mis padres por sus consejos, comprensión y amor, quienes siempre han apoyado y motivado mi formación académica y han estado ahí en los momentos más difíciles.

A mis hermanos que son un ejemplo a seguir, que por sus múltiples logros me han enseñado a que nunca hay que rendirse a pesar de las adversidades. Gracias por siempre creer en mí.

A mis sobrinos, que son una motivación más para superarme día con día. Siempre estaré ahí para apoyarlos y guiarlos cuando más lo necesiten.

A Crys, por ser mi compañero fiel de principio a fin en este recorrido, por acompañarme en aquellos momentos de cansancio y frustración. Gracias por tu paciencia y amor incondicional, por ser mi gran apoyo moral y por alentarme a siempre seguir adelante.

A mi tutor, por su gran apoyo, motivación, paciencia y dedicación. Ha sido un privilegio contar con su guía. Gracias por transmitirme sus conocimientos y consejos.

A aquellos maestros que se tomaron el tiempo para escucharme, motivarme constantemente y aconsejarme cuando más lo necesitaba.

A mis amigos, quienes nos apoyamos mutuamente en nuestra formación profesional, gracias amigos por estar ahí incondicionalmente y echarme porras, algunos de ustedes, a pesar de la distancia o el tiempo que nos hemos dejado de ver.

Agradezco al Consejo de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico otorgado para la realización de este trabajo de investigación.

Se agradece a la Dirección General de Asuntos del Personal Académico (DGPA) por el apoyo otorgado para la realización del proyecto PAPYME PE105816 "La sustentabilidad aplicada en la Ingeniería Civil"



ÍNDICE

INTRODUCCIÓN

01 | LOS HUMEDALES ARTIFICIALES COMO SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUA GRIS

| | |
|---|----|
| 1.1 El reúso del agua gris en la vivienda | 09 |
| 1.1.1 Métodos de tratamiento de aguas grises | 12 |
| 1.2 Los Humedales Artificiales | 12 |
| 1.2.1 Componentes del sistema y criterios de diseño | 13 |
| 1.2.2 Clasificación de los Humedales Artificiales | 16 |
| 1.2.3 Capacidad de remoción de contaminantes | 18 |

02 | LOS MUROS VERDES EN EL ENTORNO URBANO

| | |
|---|----|
| 2.1 Beneficios ecológicos, ambientales y sociales de los Muros Verdes | 23 |
| 2.2 Clasificación de los Muros Verdes | 26 |
| 2.3 Componentes del sistema | 27 |

03 | LA INTEGRACIÓN DE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES Y MUROS VERDES: EL VERDEM

| | |
|--|----|
| 3.1 Investigaciones previas referentes a la integración de los sistemas | 33 |
| 3.2 El VERDEM y la selección de criterios de la NMX-AA-164-SCFI-2013 y el PAAS | 36 |

04 | EL DISEÑO DEL VERDEM Y PROCESO DE EXPERIMENTACIÓN

- 4.1 Diseño del sistema modular 41
 - 4.1.1 Forma y materiales empleados 41
 - 4.1.2 Sistema de fijación a muro 43
- 4.2 Proceso de experimentación 43
 - 4.2.1 Fase 1- Elección del sustrato a emplear 44
 - 4.2.1.1 Sustratos identificados 44
 - 4.2.1.2 Plantas identificadas 44
 - 4.2.1.3 Empleo de módulos – humedal 47
 - 4.2.1.4 Diseño hidráulico del módulo – humedal 49
 - 4.2.1.5 Análisis de muestras 51
 - 4.2.1.6 Resultados y Discusiones Fase 1 54
 - 4.2.2 Fase 2- Montaje del VERDEM 61
 - 4.2.2.1 Fijación y preparación de módulos 61
 - 4.2.2.2 Diseño hidráulico del sistema 62
 - 4.2.2.3 Análisis de muestras 64
 - 4.2.2.4 Resultados y Discusiones Fase 2 67





05 | EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE ACUERDO A CRITERIOS SELECCIONADOS

- 5.1 El VERDEM para la Vivienda de Interés Social; caso de aplicación 77
 - 5.1.1 Propuesta integral de instalación del VERDEM dentro de la VIS tipo elegida . 80
- 5.2 Criterios seleccionados de la norma NMX-AA-164-SCFI-2013 y del PAAS 81

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

REFERENCIAS

ANEXOS

ÍNDICE DE TABLAS Y FIGURAS

| | | |
|------------|--|----|
| Tabla 1. | Características de un agua residual | 09 |
| Tabla 2. | Composición típica de un agua gris doméstica | 11 |
| Tabla 3. | Capacidad de remoción de contaminantes de los Humedales Artificiales | 19 |
| Tabla 4. | Categorías de la norma NMX-AA-164-SCFI-2013 | 36 |
| Tabla 5. | Categorías del PAAS. | 37 |
| Tabla 6. | Criterios identificados con los que puede contribuir el VERDEM | 38 |
| Tabla 7. | Sustratos identificados | 44 |
| Tabla 8. | Especies identificadas en mercado de plantas empleadas en Humedales Artificiales | 45 |
| Tabla 9. | Periodos y proporción de alimentación a humedales | 51 |
| Tabla 10. | Resumen del desempeño total por humedal de acuerdo al análisis de contaminantes seleccionadas | 60 |
| Tabla 11. | Periodos y proporción de alimentación al sistema | 63 |
| Tabla 12. | Resumen del desempeño total del VERDEM de acuerdo al análisis de contaminantes seleccionadas | 74 |
| Tabla 13. | Límites máximos permisibles de contaminantes para aguas residuales tratadas y resultados obtenidos con el VERDEM. | 83 |
| Tabla 14. | Criterios no analizados en esta investigación | 88 |
| Figura 1. | Macrófitas de libre flotación | 16 |
| Figura 2. | Macrófitas sumergidas | 16 |
| Figura 3. | Macrófitas emergentes | 16 |
| Figura 4. | Humedal Artificial de Flujo Libre | 17 |
| Figura 5. | Humedal Artificial de Flujo Horizontal Subsuperficial | 17 |
| Figura 6. | Humedal Artificial de Flujo Vertical Subsuperficial | 18 |
| Figura 7. | Fachadas Verdes: 1)Directas, 2)Indirectas, Muros vivientes: 3) Continuos 4) Modulares, a) jardineras b) bandejas c) bolsas flexibles | 26 |
| Figura 8. | Proceso de diseño de la forma del sistema modular. Medida en milímetros. | 41 |
| Figura 9. | Dimensiones finales del módulo empleando placas de acrílico de 3 y 5mm. Medida en milímetros | 42 |
| Figura 10. | Módulo de acrílico con preparaciones de PVC | 43 |
| Figura 11. | Módulo fijado a muro a base de taquetes y escuadras unión. | 43 |
| Figura 12. | Corte lateral de módulos mostrando capas, a) H1- vermiculita, b) H2-Perlita, c) H3- tepojal | 48 |





| | | |
|------------|--|----|
| Figura 13. | a)Módulos-humedal con sistema de alimentación, b)Recipiente de almacenamiento de agua preparada con conexiones al tubo de entrada del módulo. c)Conexiones a recipiente de recolección de agua de salida, d) Manguera fijada al interior de recipiente de salida. d)Manguera con válvula en recipiente de salida. Tomada en el jardín del Centro Tecnológico de la FES Aragón | 50 |
| Figura 14. | a)Toma de muestras de agua en el afluente y efluente, b) Análisis de muestras para DQO, c) Pípeteo en reactivos para Amoníaco | 52 |
| Figura 15. | a) Peso de sustratos en báscula analítica b) Sustratos vaciados de probetas | 52 |
| Figura 16. | Concentración de Demanda Química de Oxígeno, (DQO) en afluente y efluente de cada humedal | 54 |
| Figura 17. | Concentración de Amoníaco (NH_3), Nitrito (NO_2), Nitrate (NO_3), Nitrógeno Total (NT) en el afluente y el efluente de cada humedal | 55 |
| Figura 18. | Concentración de Sólidos Totales (ST), Sólidos Totales Fijos y Sólidos Totales Volátiles (STV), en el afluente y efluente de cada humedal | 57 |
| Figura 19. | Unidades de Turbidez Nefelométricas en afluente y efluente de cada humedal | 58 |
| Figura 20. | Crecimiento progresivo de <i>Zantadeschia Aethiopica</i> en cada uno de los humedales. En cada imagen se observa de izquierda a derecha el H1, H2 y H3. a) Crecimiento presentado en la semana 5, b) Crecimiento presentado en la semana 10, c) Crecimiento presentado en la semana 16 | 59 |
| Figura 21. | Cara posterior de H1 y H2 de izquierda a derecha, que muestra el crecimiento de algas en la capa superior del H2. También se observa un mayor desarrollo de raíz en el primero. Se muestra además la presencia de humus dentro de los humedales, así como en H3 (extremo derecho) en el proceso de desmontaje del sistema | 61 |
| Figura 22. | Fijación de módulos en muro | 61 |
| Figura 23. | Diseño hidráulico del VERDEM | 62 |
| Figura 24. | a)Muestra de agua del afluente y del efluente para análisis de turbidez, b)Proceso de filtrado por succión con matraz, Crisoles Gooch y microfibras filtrantes para retener los SST, c)Proceso de filtrado por succión con matraz, Embudo Buchner, papel filtro de poro fino para retener grasas y aceites, d) Equipo Soxhlet y cartucho de extracción de celulosa con papel filtro, e)Empleo de termómetro de mercurio para toma de temperaturas en | |

| | | |
|------------|---|----|
| | frente de módulos, f) Empleo de termómetro digital para toma de temperaturas en la parte posterior de módulos | 65 |
| Figura 25. | Izquierda, filtro de aserrín para grasas y aceites, derecha, garrafrones conteniendo agua gris | 66 |
| Figura 26. | Ubicación de los módulos en la cara interior del muro. Puntos rojos y azules indican posición del termómetro infrarrojo para la toma de temperaturas en la ubicación de módulos y en el área en donde no se fijaron | 66 |
| Figura 27. | Concentración de Demanda Química de Oxígeno (DQO), en afluente y efluente del VERDEM por cada periodo | 67 |
| Figura 28. | Concentración de Amoníaco (NH ₃), Nitrito (NO ₃), Nitrito (NO ₂) Y Nitrógeno Total (NT) en el afluente y el efluente del VERDEM por cada periodo. . | 69 |
| Figura 29. | Concentración de Sólidos Suspendidos Totales (SST), Sólidos Suspendidos Volátiles (SSV), y Sólidos Suspendidos Fijos (SSF), en afluente y efluente del VERDEM por cada periodo | 70 |
| Figura 30. | Unidades de Turbidez Nefelométricas en afluente y efluente del VERDEM | 71 |
| Figura 31. | Crecimiento de plantas en la semana 2, 7 y 12, de izquierda a derecha | 72 |
| Figura 32. | Fotografías tomadas con la cámara termográfica a las 10:00, 11:00, 12:00, 13:00 h | 73 |
| Figura 33. | Diferencia de temperaturas de cada uno de los puntos tomados | 74 |
| Figura 34. | Concentración de Grasas y Aceitnes en el afluente y efluente del VERDEM | 74 |
| Figura 35. | Tanques elevados de, 1)Geovillas de Terranova Zona Norte, 2)Real del Valle Zona Norte, 3)Real del Valle Zona Sur, 4)Geovillas de Terranova Zona Sur - sitio de estudio), PT) Planta de Tratamiento, PE)Pozo de Extracción | 78 |
| Figura 36. | Cauce del agua tratada proveniente de la Central Termoeléctrica de Lechería, Desemboca agua tratada proveniente de la Planta de Tratamiento, Cauce del agua tratada que se dirige al Lago . . . | 79 |



RESUMEN

La sobreexplotación de mantos acuíferos en la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), aunada a una baja cobertura de tratamiento de agua residual, se ha convertido en un problema crítico. A esto se le suma que se incrementa cada vez más la demanda de Viviendas de Interés Social (VIS), lo cual implicará una mayor cantidad de infraestructura. Debido a esto, se propuso la implementación de un Humedal Artificial en la VIS para tratar agua gris y ser reutilizada en sitio, puesto que han demostrado ser un sistema de tratamiento descentralizado de agua residual eficiente y económico en diversos países, sobre todo para tratar agua gris doméstica. Puesto que el área libre en la VIS es un problema evidente, se propuso que el sistema fuera adaptado a un Muro Verde para que forme parte del envolvente y aprovechar las superficies verticales.

El objetivo de esta investigación fue construir un modelo de experimentación denominado el VERDEM, el cual se diseñó para integrar ambas tecnologías. Este se constituyó con base en cinco módulos de acrílico fijados a un muro con taquetes de expansión, empleando como sustrato la vermiculita y diferentes especies ornamentales. Debido a los beneficios ambientales que resulta de dicha integración, el sistema es capaz de contribuir al cumplimiento de diversos criterios establecidos dentro de

la norma NMX-AA-164-SCFI-2013 y el PAAS, iniciativas gubernamentales Mexicanas desarrolladas para impulsar la edificación sustentable. El sistema fue evaluado de acuerdo a diversos criterios seleccionados dentro de la categoría Energía, Agua y Calidad de Vida/Ambiente y Responsabilidad Social, tomando como caso de aplicación una VIS tipo.

Se demostró que el sistema es capaz de contribuir o en algunos casos cumplir con los criterios seleccionados debido a su capacidad de tratar 100 L/día de agua gris en 1.20 m², removiendo en promedio más del 80% de contaminantes y ahorrando un 27% de agua potable para una vivienda de cuatro personas. Además sugirió tener buena capacidad de aislamiento térmico, pues se registraron diferencias de temperatura superficial en la cara interior del muro de hasta 3.50°C en donde se colocó el VERDEM y en donde no fue colocado. Dados beneficios que el sistema ofrece, éste puede impulsar la edificación sustentable.

Palabras clave: Humedales artificiales, muros verdes, vivienda de interés social, agua gris, ahorro de agua, edificación sustentable.

ABSTRACT

The overexploitation of aquifers in the Metropolitan Zone of the Valley of Mexico, coupled with a low coverage of wastewater treatment, has become a critical problem. To this we add that the demand of Low Income Housing (LIH) is increasing, which will imply a greater amount of infrastructure. Due to this, the implementation of an Artificial Wetland was proposed in Social Housing to treat and reuse gray water on site, since they have proven to be an efficient and economical decentralized wastewater treatment system in several countries, especially treating domestic gray water. Since the free area in the LIH is an obvious problem, it was proposed that the system be adapted to a green wall to form part of the envelope and take advantage of vertical surfaces.

The main goal of this research was to construct an experimentation model named the VERDEM, which was designed to integrate both technologies. This was constructed based on five acrylic modules fixed to a wall with wall anchors, using vermiculite as the substrate and different ornamental species. Due to the environmental benefits that result from the integration of both technologies, the system is capable to contribute to the accomplishment of diverse criteria established in the norm NMX-AA-164-SCFI-2013 and the PAAS, which are Mexican government initiatives

developed to promote the construction of sustainable buildings. The system was assessed according to diverse criteria selected under the Energy, Water, Life Quality/Ambiance & Social Responsibility categories, taking as a case of application, a LIH prototype.

The system demonstrated to be capable of contributing or in some cases accomplish the criteria selected due to its capacity to treat 100lt/day of greywater in 1.20m², removing more than 80% of the pollutants and saving 27% of potable water in a household of four persons. It also suggested to have good capacity for thermal because temperature difference in the interior wall surface up to 3.50°C were registered, between the area where the VERDEM was placed and where it was not placed. Given the benefits the system offers, it can boost sustainable building.

Key words: Constructed wetlands, green walls, low income housing, greywater, water savings, sustainable buildings.





INTRODUCCIÓN





La industria de la construcción altera directa e indirectamente el medio ambiente debido a la cantidad de recursos naturales que consume a lo largo de su ciclo de vida. En este sentido, el gobierno Mexicano ha desarrollado diversos instrumentos de autorregulación para mitigar el impacto ambiental e impulsar la edificación sustentable en el país. Entre estas se encuentra el Programa de Auditoría Ambiental Sustentable (PAAS), anteriormente llamado Programa de Certificación de Edificios Sustentables (PCES), mismo que establece un estándar para calificar a las edificaciones de la Ciudad de México, así como la norma NMX-AA-164-SCFI-2013, que establece los criterios y requerimientos ambientales mínimos para una edificación sustentable, con campo de aplicación en toda la república.

Las edificaciones en México son responsables del 17% del consumo total de energía, 5% del consumo total de agua, 25% del consumo total de electricidad, 20% de las emisiones de dióxido de carbono y 20% de los desechos generados, (CCA, 2008 p.22). De acuerdo a lo anterior y según una encuesta realizada en Septiembre del 2015, por parte de la SEMARNAT,¹ en conjunto con la CMIC² y SUMe,³ a cerca del panorama actual

¹ Siglas para Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, la cual se encarga de todo lo relacionado a la protección conservación y aprovechamiento de los recursos naturales del país y de la conformación de la política ambiental nacional para el desarrollo sustentable.


² Siglas para Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción, la cual es una institución pública, autónoma, con personalidad jurídica propia y jurisdicción en todo el territorio de la República Mexicana, que representa los asuntos que conciernen a la industria de la construcción en lo general. (CMIC, 2016)

³ Siglas para Sustentabilidad para México, la cual es una asociación sin fines de lucro que tiene como objetivo sumar esfuerzos hacia un México sustentable (SUMe, 2016)

de la edificación sustentable en nuestro país, uno de los temas que más preocupa a la población es la escasez del agua. Los resultados arrojaron que el 95.6% de los encuestados considera muy importante el uso eficiente del agua en las edificaciones. (Niño, Martha, 2015, p. 15-17). La escasez de agua en México resulta evidente sobre todo en sus principales zonas urbanas en donde existe una mayor sobrepoblación. Tal es el caso de la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), la cual cuenta con más de 20 millones de habitantes, lo que la convierte en la zona más poblada de todo el país, contando con la menor extensión territorial y la mayor densidad poblacional, principalmente urbana, (De la Peña et al, 2013, p. 26). En ésta, la mayor parte de los mantos acuíferos se encuentran sobre-explotados (CONAGUA, 2014a, p. 58), lo que resulta en un tema de alerta para las futuras generaciones.

La ZMVM tiene una cobertura de tratamiento de agua por debajo del 50%, (CONAGUA, 2014b, p. 77), lo cual indica que una gran parte de las aguas servidas regresan a los cauces naturales sin ningún tratamiento contaminando los cuerpos de agua, (Lahera R., 2010, p. 60). Aunado a esto, la política en México ha sido centralizar el tratamiento de aguas en grandes plantas, siendo uno de los más utilizado el de lodos activados (CONAGUA, 2014b, p.78), que requieren transportar grandes caudales de agua hasta ellas, implicando alto consumo de energía eléctrica, además de que requieren de un uso intensivo de productos químicos. Por





otro lado, generan emisiones contaminantes al aire y producen grandes cantidades de lodos tóxicos para los que no se tienen sitios seguros de disposición final (Lahera, R., 2010, p. 62). A lo anterior se suma que la Vivienda de Interés Social (VIS) es un sector que se encuentra en constante crecimiento y del cual se prevé que en los próximos 10 años se presentará la mayor demanda, (Forbes México, 2016), lo cual requerirá de una mayor cantidad e infraestructura.

De acuerdo a la problemática existente referente a la escasez de agua, a un bajo nivel de tratamiento de la misma en la ZMVM y, a la constante demanda de VIS, es por lo que la presente investigación tuvo como objetivo general, diseñar y construir un sistema de tratamiento descentralizado de agua gris doméstica para este sector como modelo de experimentación. Se propone un sistema descentralizado que genere un servicio por unidad de vivienda, ya que estos requieren de un menor consumo energético y se facilita la posibilidad de reúso de agua dentro de la vivienda puesto que no requiere transportarla a grandes distancias. En cuanto al objetivo específico se planteó que el sistema de tratamiento se diseñara a partir de la integración de un Humedal Artificial (HA) y un Muro Verde (MV). Los HA son una tecnología eficiente y amigable con el medio ambiente, misma que ha sido implementada como sistema descentralizado para viviendas en diferentes países. Ya que los HA requieren de superficies horizontales para su instalación, se propuso su adaptación a un MV

para aprovechar las superficies verticales, puesto que normalmente no hay suficientes áreas libres en este tipo de viviendas. Esto lograría que el sistema al formar parte de la envolvente, funcione como aislante térmico y acústico, además de proporcionar mayor estética a la fachada y reducir el CO₂ en el ambiente, los cuales son algunos de los beneficios ambientales que proporciona un MV. Al diseño de la integración de ambos sistemas se le designó el nombre de VERDEM.

Gracias a los diferentes beneficios ambientales que se genera al integrar ambos sistemas, logra contribuir con el cumplimiento de diversos criterios establecidos en la NMX-AA-164-SCFI-2013 y el PAAS, dentro de las categorías Energía, Agua y Calidad de Vida/Ambiente y Responsabilidad Social. Por tal motivo, se seleccionaron algunos criterios los cuales se especifican en el Capítulo 3, para que el VERDEM sea evaluado aplicándolo dentro una VIS tipo seleccionada.

A partir de lo anterior se establece como hipótesis que si se integra un HA adaptado a un MV como parte de la envolvente de una VIS, entonces el VERDEM podrá contribuir al cumplimiento de los criterios seleccionados de la norma NMX-AA-164-SCFI-2013 y del PAAS.

Cabe destacar que el interés por desarrollar dicho tema surge a partir del conocimiento de la existencia de diferentes sistemas de certificación

de edificios sustentables que han emergido en diferentes países y que a pesar de que en México también se tienen programas de este tipo, es importante que se desarrollen nuevas tecnologías que respondan a las necesidades propias del país para que impulsen las iniciativas gubernamentales, sobre todo en el tema de reutilización y ahorro de agua.

El contenido de la investigación se divide en cinco secciones, en las primeras dos se presenta el marco teórico de los HA y los MV. En la tercera sección se exponen las investigaciones previas referentes a la integración de ambas tecnologías. También se describen las categorías y criterios que conforman la norma NMX-AA-164-SCFI-2013 y el PAAS, así como los criterios seleccionados. En la cuarta sección se presenta la metodología llevada a cabo para el diseño y construcción del VERDEM como sistema modular y, el proceso de experimentación el cual se dividió en dos fases; la primera consistió en seleccionar el sustrato adecuado de acuerdo al análisis en cuanto a su eficiencia de remoción de diferentes contaminantes, pesos y crecimiento de plantas. En la segunda fase se procedió a montar el VERDEM empleando el sustrato seleccionado, el cual fue la vermiculita, y empleando diferentes especies ornamentales utilizadas anteriormente en HA. Se evaluó la eficiencia de remoción de diferentes contaminantes, crecimiento de plantas y las temperaturas presentes en la parte frontal y en la parte posterior del VERDEM, así como de la cara interior del muro para analizar las diferencias de temperatura superficiales.

En la quinta y última sección se presenta un estudio de campo, del sitio de ubicación de la VIS tipo elegida como caso de aplicación del VERDEM, pues es un sitio que representa la problemática actual en cuanto a escasez de agua y un deficiente sistema de tratamiento de agua residual. En esta misma sección se muestra una propuesta integral del sistema de tratamiento empleando el VERDEM para su correcto funcionamiento dentro de la VIS. Posteriormente se analiza de manera puntual cómo es que el sistema contribuye al cumplimiento de los criterios seleccionados de la NMX-AA-164-SCFI-2013 y del PAAS. Finalmente se presentan las conclusiones, recomendaciones e investigaciones futuras que se deben continuar referentes a la investigación realizada.





01

LOS HUMEDALES ARTIFICIALES COMO SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUA GRIS





La posibilidad de tratar el agua residual doméstica en sitio y ser reutilizada, permite generar ahorros importantes del agua proveniente de la red municipal. Por su composición, el agua gris doméstica resulta más fácil de tratar y reusar ya que implica una menor cantidad de infraestructura y menos riesgos para la salud. Para esto, los HA han comprobado ser una alternativa sustentable como sistema de tratamiento descentralizado en diferentes países, sobre todo los de Flujo Vertical Subsuperficial, (FVSS) resultando en un sistema eficiente para tratar agua gris. Con base en lo anterior, en este apartado se explica la composición del agua residual doméstica, destacando la importancia del agua gris y sus opciones de tratamiento. Finalmente se establecen los tipos de HA y las implicaciones para su correcto diseño, así como las ventajas de un HAFVSS.

1.1 EL REÚSO DEL AGUA GRIS EN LA VIVIENDA

Las aguas residuales son aguas de composición variada provenientes de las descargas de usos público urbanos, doméstico, industrial, comercial, de servicios, agrícola, pecuario, de las plantas de tratamiento y en general, de cualquier uso, así como la mezcla de ellas, (LAN, 2016). Presentan una serie de características físicas, químicas y biológicas que se deben de conocer para determinar el tipo de tratamiento a utilizar dependiendo del reúso que se le va a dar, (Tabla 1).

La determinación del contenido de materia orgánica e inorgánica puede llevarse a cabo empleando diferentes metodologías como

Tabla 1. Características de un agua residual

Fuente: Metcalf & Eddy, (2003)

Características Físicas

| | |
|-------------|--|
| Sólidos | El agua residual contiene una gran variedad de materiales sólidos que van desde trapos a material coloidal |
| Turbidez | Es la medida de la propiedad de transmisión de luz en el agua que se utiliza para indicar la calidad del agua |
| Color | Indica la edad del agua residual. El agua fresca es normalmente de color café grisácea. Mientras pasa una mayor cantidad de tiempo retenida y las condiciones anaeróbicas se desarrollan, el color cambia a gris oscuro hasta negro. |
| Temperatura | El agua residual comunmente tiene mayor temperatura que la de un agua de suministro. El oxígeno es menos soluble en agua caliente y va acompañado con mayores reacciones bioquímicas. |

Características Químicas

Materia orgánica

| | |
|--------------------------|--|
| Componentes agregados | Consiste en proteínas (40-60%), carbohidratos (25 a 50%) y grasas y aceites (8 a 12%) y urea en pequeñas cantidades. |
| Componentes Individuales | Se refiere a contaminantes prioritarios, la mayor parte clasificados como Componentes Orgánicos Voátiles. |

Materia inorgánica

Constituyentes no metálicos

| | |
|--------------------------|---|
| pH | Es medio para expresar la concentración de iones hidrógeno en el agua. La concentración adecuada para la existencia de vida biológica es entre 6 y 9. |
| Cloruros | Se puede encontrar sobre todo en el excremento humano, el cual contiene alrededor de 6g por persona/día. |
| Alcalinidad | Resulta de la presencia de hidróxidos, carbonatos y bicarbonatos de elementos como calcio, magnesio, sodio, potasio y amoníaco. |
| Nitrógeno | Son esenciales para el crecimiento de microorganismos, plantas y animales. Son conocidos como nutrientes o bioestimulantes |
| Fósforo | |
| Azufre | Los iones de azufre están presentes en el agua residual y se requiere para la síntesis de proteínas y se libera en su degradación |
| Gases | Los gases comúnmente encontrados en aguas residuales expuestas al aire incluyen nitrógeno, oxígeno, dióxido de carbono, sulfuro de hidrógeno, amoníaco y metano. |
| Olores | Estos son causados por los gases producto de la descomposición de materia orgánica o por sustancias agregadas al agua residual |
| Constituyentes metálicos | Se pueden encontrar diferentes metales, tales como cadmio, cromo, cobre, hierro, plomo, magnesio, mercurio, níquel y zinc, siendo la mayor parte necesarios para el crecimiento biológico pero de encontrarse en concentraciones excesivas, pueden ser tóxicos. |

Características Biológicas

| | |
|-----------------|---|
| Microorganismos | Incluye bacterias, hongos, algas, protozoarios, plantas y animales y virus. |
| Patógenos | Se pueden encontrar en diferente tipo de bacterias, protozoarios, helmintos y virus presentes en excremento de humanos y de animales que cargan con enfermedades infecciosas. |

la Demanda Química de Oxígeno (DQO)⁴ y la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅).⁵

Las aguas residuales domésticas se pueden clasificar en aguas grises y aguas negras. Las aguas grises o jabonosas, son las aguas servidas libres de materiales fecales, como las provenientes de la cocina, del lavabo, regaderas y lavadora, (CONAFOVI, 2005 p. 21). Una composición típica del agua gris doméstica se presenta en la Tabla 2.

Las aguas negras son las descargadas del inodoro y es la que contiene excremento humano y orina, rica en sólidos suspendidos, nitrógeno y coliformes fecales y se pueden encontrar patógenos causante de diversas enfermedades (Langergraber & Muellegger, 2005 p. 438). Debido a que el agua gris contiene menos contaminantes que el agua negra, requerirá de menos recursos para su tratamiento, ya que al tratar las heces fecales, se requiere inevitablemente un tratamiento que garantice la destrucción de posibles patógenos (ibid., p. 439) Por ende, es más viable que el agua gris

4 Representa la cantidad de oxígeno consumido al oxidar químicamente las sustancias orgánicas y algunas inorgánicas que están presentes en el agua residual, sin intervención de los microorganismos, (Ríos, 2013).


5 Nos indica la materia orgánica biodegradable presente en una muestra de agua residual. Se obtiene por la diferencia de la concentración de oxígeno disuelto en el agua después de ser incubada la muestra durante un periodo de cinco días, en unas condiciones específicas: a 20°C, en la oscuridad y con un pH neutro. (ibid.,).

Tabla 2. Composición típica de un agua gris doméstica

Fuente: Adaptado de WHO- ROEM, (2006) p. 11

| Parámetro | Unidad | Intervalo |
|---------------------|--------|--------------|
| Sólidos Suspendidos | mg/L | 45-330 |
| Turbiedad | NTU | 22-200 |
| DBO ₅ | mg/L | 90-290 |
| Nitrito | mg/L | < 0.1 - 0.8 |
| Amoniaco | mg/L | < 0.1 - 25.4 |
| Nitrógeno Total | mg/L | 2.1-31.5 |
| Fósforo Total | mg/L | 0.6-27.3 |
| Sulfato | mg/L | 7.9-110 |
| pH | mg/L | 6.6-8.7 |

sea considerada para reúso dentro de la vivienda y así disminuir las probabilidades de afectaciones a la salud. Además, el agua gris constituye el 60% de consumo de agua doméstica, siendo el 10% generado en la cocina, el 15% en lavado de ropa, 10% en riego y 25% en la regadera y lavabo, por lo que la reutilización de ésta para descarga de olores puede reducir el consumo a un 35% en una familia de 4 personas y así disminuir a su vez el vertido de aguas residuales a los colectores generales (CONAVI, 2005, p. 22). Esto provocaría la reducción de agua residual que requiere ser tratada en los municipios. Adicionalmente, generaría menor estrés sobre



fuentes naturales al reducir la demanda de agua y a su vez se ahorraría energía ya que se estaría bombeando menor cantidad de agua potable a las viviendas.

1.1.1 Métodos de tratamiento de aguas grises

Las aguas grises requieren ser tratadas para remover sustancias que pueden ser dañinas a la salud humana, al igual que para las plantas, el suelo y el medio ambiente, así como para evitar la contaminación de sistemas de irrigación. Los métodos que se pueden emplear para su tratamiento van desde sistemas primarios a secundarios, dependiendo del propósito del reúso (WHO- ROEM, 2006 p. 15):

- *Sistemas de tratamiento primarios:* Utilizan filtros o sedimentación para remover los aceites, grasas y sólidos. Son los más atractivos económicamente para aguas grises ya que no requieren electricidad ni uso de compuestos químicos para operar, (*ibid.*, p. 16). Si la trampa de grasa es el único pre-tratamiento de las aguas grises, puede que sea necesario adicionar un tanque de sedimentación o tener una salida en la parte inferior de la trampa (Hoffman & Platzer, 2011 p. 20).
- *Sistemas de tratamiento secundarios:* Tratan el agua gris para remover con mayor eficiencia los aceites, grasas, sólidos y materia orgánica. Esto permite que el agua sea utilizada para irrigación por goteo o métodos de riego superficial. Son más costosos debido a la inversión inicial y manteni-

miento. Sin embargo, debido al nivel de tratamiento, representa menores riesgos para la salud en caso de entrar en contacto directo. Hay diferentes tipos de tratamiento secundarios como los filtros de arena, lodos activados, humedales artificiales, discos biológicos y filtro percolador, (WHO-ROEM, 2006 p. 16).

Todos los sistemas de tratamiento primario para agua gris deben de incorporar un tanque de sedimentación para remover grasas y sólidos. Cabe mencionar que el agua gris no tiene mal olor inmediatamente después de ser descargada, sin embargo si se colecta en un tanque, consumirá el oxígeno muy rápidamente y se convertirá en anaerobia generando malos olores, por lo que la clave de un sistema de tratamiento satisfactorio recae en un procesamiento inmediato (*ibid.*, p.15).

1.2 LOS HUMEDALES ARTIFICIALES

Los HA son una alternativa de tratamiento de secundario viable puesto que son considerados como una ecotecnología sustentable que se ha empleado como sistema descentralizado de tratamiento de aguas residuales domésticas en diferentes países (Valipour, & Ahn 2016). Los HA se caracterizan, en comparación con los sistemas convencionales de tratamiento, por su bajo costo, bajo mantenimiento, bajo consumo energético, fácil instalación y por no requerir mano de obra especializada para su opera-

ción, además de tener la capacidad de producir agua tratada con la calidad requerida por las normatividad (Arias *et al.*, 2003, p. 18, Noyola, *et al.*, 2013, p.34, Vymazal, *et al.* 2006 p. 91, Wu, *et al.* 2015, p. 594). Otra ventaja de este tipo de sistemas es su versatilidad ya que sus características pueden diferir en gran medida de acuerdo a los requerimientos del usuario, sitio geográfico e incluso condiciones climáticas de la zona (Arias *et al.*, 2003, p. 17). Sin embargo, una de las mayores limitantes de este tipo de sistemas es que demanda un uso considerable de suelo, el cual también va a depender de la cantidad de agua que se requiere tratar.

Los HA son sistemas de ingeniería que han sido diseñados y construidos para tomar ventaja de los mismos procesos que ocurren en humedales naturales pero en un ambiente más controlado, en donde se involucra vegetación, suelos y ensambles microbianos asociados para asistir en el tratamiento de aguas residuales (Vymazal, 2010, p. 530). En las civilizaciones antiguas, los humedales naturales eran utilizados para verter las aguas residuales para deshacerse de ellas, pero el potencial de contaminación se reducía antes de que se incorporaran a los cauces (Arias *et al.* 2003, p. 18). Esto es gracias al proceso de fitodepuración que ocurre naturalmente en los ecosistemas que reciben aguas contaminadas. La fitodepuración (phyto = planta, depurare = limpiar, purificar), es la reducción o eliminación de contaminantes de las aguas residuales, por medio de una serie de complejos procesos biológicos y fisicoquímicos en los que

participan las plantas del propio ecosistema acuático (Gonzalez *et al.*, 2009, p. 61).

1.2.1 Componentes del sistema y criterios de diseño

Los HA se componen de una capa impermeable, de agua, de sustratos, sedimentos y restos de vegetación, vegetación, microorganismos y fauna:

- *Capa impermeable*: Se debe compactar y alisar la superficie del fondo del humedal dejando una pendiente para asegurar el drenaje. Posteriormente se coloca una barrera impermeable para impedir que el subsuelo se contamine con agua residual (Martínez & Márquez 2014, p. 2).

- *Hidrología*: La hidrología es el factor de diseño más importante en un HA. Puede ser afectada por la densidad de la vegetación ya que puede obstruir el flujo, siendo sinuoso el movimiento del agua a través de la red de tallos, hojas, raíces y rizomas, bloqueando la exposición al viento y al sol. Por otro lado, debido al área superficial del agua y su poca profundidad, el sistema actúa fuertemente con la atmósfera a través de la lluvia y la evapotranspiración (*ibid.*, p. 3).

- *Sustratos, sedimentos y restos de vegetación*: El sustrato es en donde se almacenan muchos contaminantes y en donde tienen lugar las transfor-





maciones químicas y biológicas. La permeabilidad de los sustratos afecta el movimiento del agua en el humedal. Los sedimentos y restos de vegetación se acumulan en el humedal debido a la baja velocidad del agua. Esto ayuda a aumentar la cantidad de materia orgánica en el humedal la cual da lugar al intercambio de materia y fijación de microorganismos, además de que es una fuente de carbono, que proporciona la energía para llevar a cabo las reacciones biológicas en el humedal (*ibid.*, p. 4).

- **Vegetación:** Las plantas acuáticas desempeñan el papel de la remoción de nutrientes y contaminantes del agua incorporándolos a su tejido vegetal. A diferencia de las plantas terrestres, las plantas acuáticas muestran epidermis muy delgada a fin de reducir la resistencia al paso de gases, agua y nutrientes. Comprende tejidos con una red de conductos huecos en los que se almacena y circula el aire con oxígeno hacia las raíces y de allí hacia la rizósfera. (Gonzalez *et. al.*, 2009, p. 68-69). Las raíces forman un biopelícula que sirve de soporte para la adaptación de los microorganismos aerobios, generándose así, una zona de elevada biodegradación de material orgánico (Martínez & Márquez 2014, p. 5).

- **Microorganismos:** Los organismos heterótrofos como bacterias, protozoos, actinomicetos y hongos, se desarrollan naturalmente en los HA, concentrándose alrededor de la superficie de partículas sólidas, sedimentos, desechos y partes sumergidas de las plantas. Las bacterias son los

responsables de la degradación de la materia orgánica y remoción de la contaminación orgánica por intervenir en la liberación de compuestos gaseosos del carbono hacia la atmósfera. Por otro lado, el nitrógeno orgánico y el fósforo lo transforman hacia formas asimilables para las plantas, mientras que las bacterias anaerobias conducen a la desnitrificación que se libera hacia la atmósfera. Los protozoos al alimentarse de bacterias, regulan la población bacteriana responsable de la descomposición de la materia orgánica. Los hongos se alimentan de los restos de alimentos o residuos de plantas, contribuyendo a reducir la carga orgánica contaminante del sistema (Gonzalez *et. al.*, 2009, p. 66).

- **Fauna:** Los HA proveen un hábitat para una rica diversidad de invertebrados y vertebrados. Los animales invertebrados, como insectos y gusanos, contribuyen al proceso de tratamiento, alimentándose de la materia orgánica. Las larvas de muchos insectos son acuáticas y consumen cantidades significativas de materia. Otros insectos, como los mosquitos, pueden ser dañinos o molestos para el ser humano y en algunos emplazamientos pueden constituir una plaga importante contra la que hay que actuar (*ibid.*, p. 69). Aunque los invertebrados son los animales más importantes en cuanto a la mejora de la calidad del agua, los HA también atraen a una gran variedad de anfibios, tortugas, mamíferos y aves, incluso patos silvestres, pero esto dependerá del tipo de HA que se esté empleando ya que no todos logran el desarrollo de dicha fauna.

Para diseñar un HA, se deben considerar diferentes criterios. Los principales incluyen la selección de plantas, sustrato, profundidad del agua, carga hidráulica, *tiempo de retención hidráulico* (TRH) y modo de alimentación.

- *Selección de plantas:* Se debe considerar su tolerancia a agua saturada en condiciones anóxicas y de hiper-eutrofización, así como la capacidad de absorción de contaminantes y la adaptabilidad a climas extremos, (Wu, *et. al.*, 2015, p. 596). Se deben usar especies locales, que crecen naturalmente en humedales o riberas de los ríos debido a que sus raíces ya están adaptadas a crecer en condiciones de agua saturada. Las plantas no requieren de inundaciones permanentes, pero deben ser capaces de afrontar temporadas de inundación y encharcamiento (Hoffman, & Platzer, 2011, p. 18). Se recomienda una densidad del 80% de cobertura de plantas en la superficie del HA (Wu, *et. al.*, 2015, p. 599).

- *Selección de sustratos:* Debe tener buena retención de humedad para ser aprovechado por la planta como vehículo para sus funciones metabólicas. La retención va en función de la granulometría del sustrato y de la porosidad en donde también se distingue su capacidad de aireación para oxigenar la raíz una vez que drene el agua. Deberá tener una estabilidad física para mantener una porosidad correcta y que no se disgregue, así como ser inerte química y biológicamente para no absorber ni suministrar

ningún elemento nutritivo. Debe tener una buena capilaridad para que transporte el agua en diferentes direcciones. Así mismo, el sustrato deberá estar disponible y debe ser de bajo costo, (Calderón & Cevallos, 2001)

- *Tiempo de Retención Hidráulico y Carga Hidráulica:* El TRH es el periodo de tiempo en el que el agua residual permanece en el sistema y la carga hidráulica es el ritmo en el que el agua es bombeada hacia el sistema. Ambos juegan un papel importante en la eficiencia de remoción de contaminantes. Mayor carga hidráulica promueve el paso rápido de agua residual, reduciendo el tiempo óptimo de contacto en el medio poroso. En el caso contrario, se puede establecer una comunidad microbiana y tener un tiempo de contacto adecuado para remover contaminantes en un TRH mayor (Wu *et al.*, 2015, p. 598).

- *Profundidad del agua:* La profundidad del agua dependerá de qué tipo de planta se utilizará y en las reacciones bioquímicas responsables de remover contaminantes por medio de la afectación de la reducción de oxígeno disuelto (*ibid.*, 2015, p. 598).

- *Modo de alimentación del afluente:* Puede ser continuo o intermitente. De modo intermitente puede obtener mayor desempeño que el continuo promoviendo mayores condiciones de oxigenación (*ibid.*, p. 598).





1.2.2 Clasificación de los Humedales Artificiales

La clasificación de los HA para tratamiento de aguas residuales puede estar dada por el tipo de macrofitas (Brix, 1993):

1- *Sistema de macrofitas de libre flotación*: Son muy diversas en forma y hábitat, desde plantas alargadas de hoja aérea u hojas flotantes y raíces sumergidas bien desarrolladas a plantas flotantes superficiales con pocas raíces o nada de raíces. Algunas plantas de libre flotación utilizadas incluyen Centella y Lechuga de agua. No existe mucha documentación al respecto de este tipo de sistemas (Figura 1).

2- *Sistema de macrofitas sumergidas*: Son plantas acuáticas las cuales mantienen todos sus órganos vegetativos por debajo de la lámina de agua (Gonzalez *et. al.*, 2009, p. 64). Sólo crecen correctamente en agua oxigenada y por ende no pueden ser usadas en agua residual con alto contenido orgánico, (Figura 2).

3- *Sistema de macrofitas emergentes*: Son aquellas que tienen parte de su estructura vegetativa dentro del agua y otra parte fuera de ésta, (*ibid.*, p. 64) (Figura. 3). Las macrofitas emergentes son las más comúnmente utilizadas en los HA debido a su buena capacidad de adaptación y resistencia a las aguas residuales (Arias *et. al.* 2003). Dentro de las especies emergen-

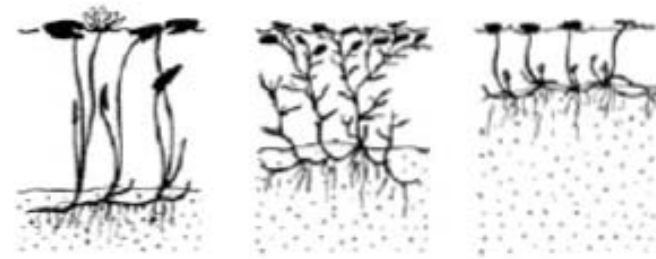


Figura 1. Macrofitas de libre flotación
Fuente: Kadlec & Wallace (2009)

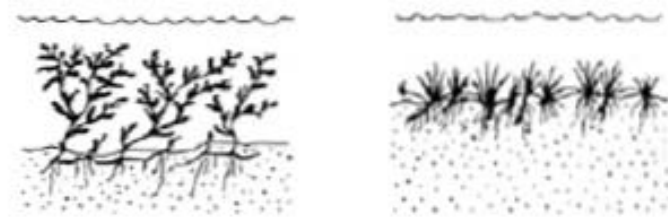


Figura 2. Macrofitas sumergidas
Fuente: Kadlec & Wallace (2009)

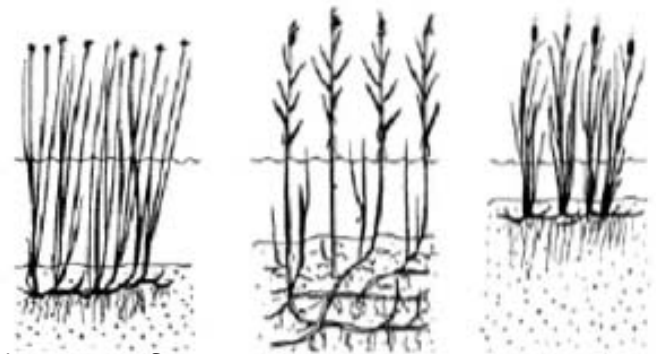


Figura 3. Macrofitas emergentes
Fuente: Kadlec & Wallace (2009)

tes más utilizadas se encuentra *Phragmites* spp., *Typha* spp., *Scirpus* spp., *Iris* spp., *Juncus* spp. y *Eleocharis* spp, (Wu, et. al., 2015, p. 596). Este tipo de sistemas se pueden clasificar de acuerdo al patrón de flujo:

a) *Humedales Artificiales de Flujo Libre o Flujo Superficial (HAFL)*: Son cuencas de poca profundidad y de baja velocidad (Vymazal, et al., 1998, p. 30). Los HAFL consisten en zanjas de 3 a 5m de ancho por 100 m de largo. El tratamiento es favorecido por la presencia de porciones sumergidas de tallos y residuos que sirven de sustrato para el crecimiento microbiano. Mientras que el agua residual atraviesa el humedal, es tratado por los procesos de sedimentación, filtración, oxidación, reducción, adsorción, y precipitación. Son similares en apariencia a humedales naturales, por lo que atraen gran variedad de vida silvestre (Kadlec & Wallace. 2009, p. 5).

b) *Humedales Artificiales de Flujo Horizontal Subsuperficial (HAFHSS)*: El agua residual es alimentada desde un extremo y fluye lentamente a través del medio poroso por debajo de la superficie en un sentido relativamente horizontal hasta alcanzar la salida, en donde es recolectada. En el proceso, el agua residual entrará en contacto con zonas aerobias en las raíces y rizomas, y anaerobias (Vymazal, 2010, p. 534). Debido a que el agua no está expuesta durante el proceso de tratamiento, el riesgo asociado con exposición a organismos patógenos es menor. Se ocupan para caudales más pequeños que los de flujo libre y por ende requiere una me-

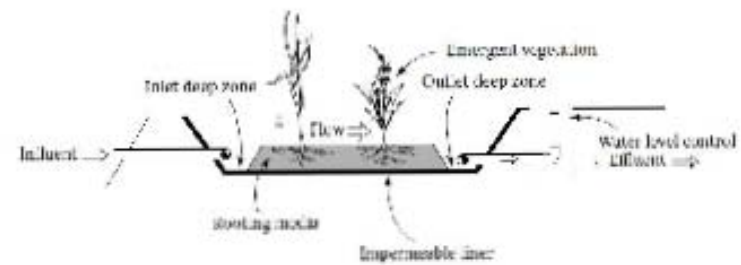


Figura 4. Humedal Artificial de Flujo Libre

Fuente: Kadlec & Wallace (2009)

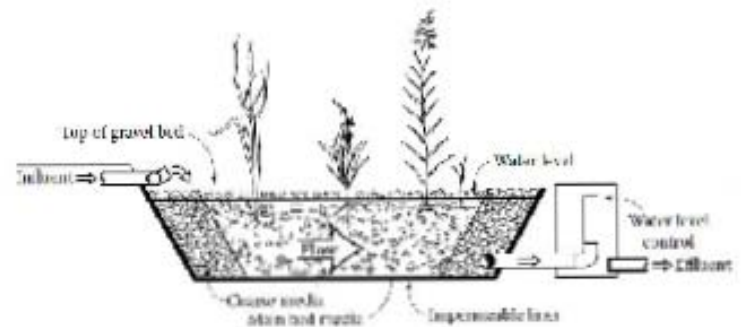


Figura 5. Humedal Artificial de Flujo Horizontal Subsuperficial

Fuente: Kadlec & Wallace (2009)

nor cantidad de espacio (Kadlec & Wallace. 2009, p. 6).

c) *Humedales Artificiales de flujo Vertical Subsuperficial (HAFVSS)*: Del mismo modo que los HAFHSS, el agua no está expuesta durante el proceso de tratamiento. El agua es alimentada de forma intermitente en



grandes lotes por la parte superior y en forma distribuida. Requiere de menor cantidad de espacio que los de flujo horizontal (Vymazal, 2010. P. 537). Un problema con las cargas intermitentes, tiene que ver con el corto tiempo de contacto con el medio poroso, por lo que se ha empleado sistemas de recirculación para aumentar el tiempo de contacto. Los HAFVSS también pueden funcionar con flujo ascendente, en donde el agua percola hacia arriba y posteriormente es recolectada en la superficie de la cama (*ibid.*, p. 538). Este sistema ha probado ser una solución fiable para el tratamiento de agua residual doméstica como sistema de

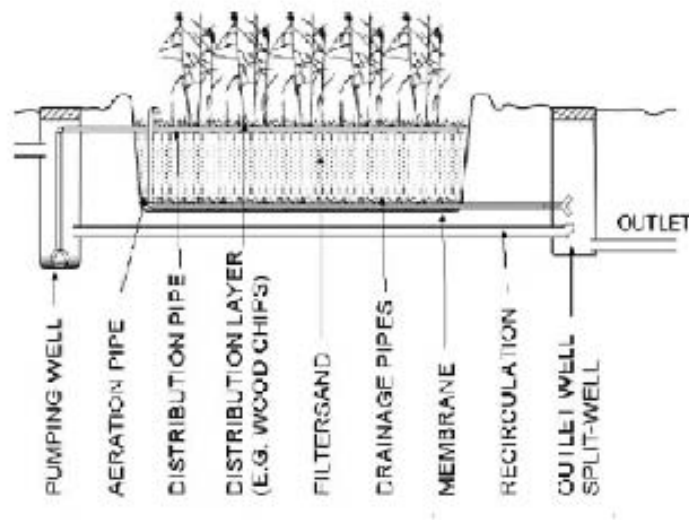


Figura 6. Humedal Artificial de Flujo Vertical Subsuperficial
Fuente: Vymazal (2009)

tratamiento in-situ por vivienda o comunidades pequeñas, sobretodo en Europa. (Stefanakis, *et. al.*, 2014, p. 29).

d) Humedales Híbridos (HH): Varios tipos de HA pueden ser combinados para obtener un nivel de tratamiento mayor, aunque normalmente contemplan los HAFVSS y HAFHSS, dispuestos de manera escalonada. Las ventajas y desventajas de cada tipo se pueden combinar para complementar cada uno (Vymazal, 2010 p. 539).

En los últimos años, se han implementado diferentes estrategias operacionales y diseños innovadores para intensificar el desempeño de los HA que va desde operación por mareas, dirección del flujo por reciprocidad, integración de lombrices, HA con pasillos de flujo circular, HA de torres híbridas, HA desconcertantes subsuperficiales, así como la combinación de los HA con tecnologías de otros campos (Wu *et al.*, 2014, p. 595).

1.2.3 Capacidad de remoción de contaminantes

Dentro de los diferentes tipos de HA, unos poseen mayores habilidades que otros para la remoción de contaminantes debido a los diferentes mecanismos de funcionamiento con los que operan. Sin embargo, los HAFSS son los más eficientes ya que al proveer el lecho de un gran número de pequeñas superficies, poros y retículos donde los microorganismos pueden

Tabla 3. Capacidad de remoción de contaminantes de los Humedales Artificiales

Fuente: Adaptado de Vymazal, et al. (2006, p.83), Sakkas, P. (2012,p.24) y Hoffman, & Platzer, (2011,p.14)

| | | HAFL | HAFHSS | HAFVSS | |
|----------------------------------|---------------------|------------------|----------|----------|-------|
| Profundidad (m) | mínimo | 0.1 | 0.2 | 0.2 | |
| | máximo | 1 | 0.8 | 0.8 | |
| Características | Remoción de plantas | Continuo | Continuo | Por lote | |
| | Presencia mosquitos | Alto | Bajo | Bajo | |
| | Olor | Si | No | No | |
| Habilidad de purificación | Verano | Alto | Alto | Alto | |
| | Invierno | Bajo | Alto | Alto | |
| Superficie (m ² /hab) | Agua negra | 20 | 5 | 3 | |
| | Agua gris | - | - | 2 | |
| Eficiencia (%) | Agua Negra | DBO ₅ | 70.3 | 82.5 | 81.6 |
| | | SST | 72.9 | 83.1 | 77.5 |
| | | NT | 51.8 | 42.3 | 39.7 |
| | | PT | 48.8 | 41.1 | 52.6 |
| | Agua Gris | DBO ₅ | - | 80-90 | 90-99 |
| | | SST | - | 80-95 | 90-99 |
| | | NT | - | 15-40 | 30 |
| | | PT | - | * | * |

*La tasa de eliminación dependen de la propiedades del material del filtro, de la longitud y del tiempo durante el cual el humedal ha estado operando.

sujetarse, la materia orgánica queda atrapada o reacciona con el sustrato. (Martínez & Márquez 2014, p. 9).

Dentro de este grupo, destacan los de flujo vertical por su mayor eficiencia en cuanto a remoción de contaminantes y la superficie requerida, además de que son los utilizados tanto para tratamiento de aguas negras como aguas grises. La ventaja de tratar aguas grises en un HA es que generalmente no tienen coloración (Hoffman, & Platzer, 2011, p. 12), por lo que puede generar mayor confianza al momento de ser reutilizada. En la Tabla 3 se muestra una comparativa general de los HA más representativos, sus características y su capacidad de remoción de contaminantes para agua gris y negra, el cual muestra que el más eficiente son los HA-FVSS.

Diversos países como Dinamarca, Reino Unido, Australia, Rep. Checa, Alemania, Bélgica, Francia, Grecia, Italia, España e Islas Canarias, emplean este tipo de HA para tratar aguas residuales domésticas, ocupando de 1 a 3.2 m²/hab. (Stefanakis, et al., 2014, p. 86). Esto, dependiendo de la cantidad de agua por ser tratada y las condiciones climáticas del sitio ya que en climas fríos, va de 4 a 5 m²/hab., mientras que en climas cálidos de 1-2m²/hab. (*ibid.*, p. 87).



02

LOS MUROS VERDES EN
EL ENTORNO URBANO





Fachadas verdes, muros verdes, muros vivientes y jardines verticales son términos descriptivos que son usados para referirse a cualquier forma de superficie de muros vegetados. (Ottelé, 2011, p. 9). En esta investigación, el término que será utilizado es el de Muros Verdes (MV).

Los MV son el resultado de enverdecer superficies verticales con plantas, ya sea enraizada al suelo, en la pared en sí o en jardineras ancladas al muro con la finalidad de cubrir los edificios con vegetación (*ibid.*, p. 16). Están diseñados y construidos para generar superficies vegetadas pero en un ambiente más controlado.

En este apartado, se presentan los diferentes tipos de MV desarrollados a la fecha, que además de ofrecer ventajas estéticas, también contribuyen a mejorar el medio ambiente del entorno urbano, unos en mayor medida que otros, por lo que se destacan los múltiples beneficios que ofrecen al ser implementados.

2.1 BENEFICIOS ECOLÓGICOS, AMBIENTALES Y SOCIALES DE LOS MUROS VERDES

La implementación de los MV surge desde hace 2,000 años en las regiones mediterráneas. Los patios traseros de los palacios eran cubiertos de enredaderas, lo cual puede sugerir una de las formas más tempranas de

MV. La idea de este concepto y su contribución en la mejora ecológica en las ciudades comienza desde 1980, siendo Alemania el lugar en donde se encuentra la mayor parte de las investigaciones realizadas al respecto. (Köhler, 2008, p. 426).

Los MV se observan en mayor medida en zonas urbanas en donde los espacios horizontales son limitados para generar áreas verdes, por lo que se han convertido en una forma de inserción de la vegetación al contexto urbano sin tener que ocupar el nivel de calle (Manso & Castro-Gomes, 2015, p. 864). En México, es prácticamente innovador, sin embargo, se ha ido manifestando cada vez más rápido. Actualmente, se puede observar en la Ciudad de México, sobre todo en sus avenidas principales como Insurgentes, Paseo de la Reforma o en zonas como Santa Fe o Polanco, la implementación de este tipo de sistemas en las fachadas de diferente corporativos, restaurantes, hoteles, centros comerciales, o inclusive edificios públicos como una oportunidad de marketing visual y como una especie de moda. Para que no se limite a ser sólo una característica estética y no sean subvalorados por sus altos costos de inversión y mantenimiento, es importante dar a conocer los múltiples beneficios ecológicos, ambientales y sociales que ofrecen estos sistemas para mejorar la calidad de vida de la población, tanto en el interior como en el exterior de los edificios. Dentro de estos, se pueden mencionar los siguientes:





- *Mejoramiento de la calidad del aire:* La vegetación puede absorber las partículas de polvo finas, las cuales se adhieren a su superficie. Así mismo puede absorber gases contaminantes como el CO₂, NO₂ y SO₂. El CO₂ es utilizado por las plantas para el proceso de la fotosíntesis creando oxígeno y biomasa. (Perini et. al., 2011^a, p. 4)

- *Reducción de la escorrentía de aguas pluviales:* El agua pluvial en las zonas urbanizadas es generalmente encaminada hacia superficies impermeables que direccionan hacia un sistema de alcantarillado. Pueden ocurrir inundaciones cuando el drenaje es incapaz de almacenarlas. Los MV pueden tener la capacidad de retener la escorrentía de aguas pluviales dentro de sus espacios rellenos de sustrato (Sheweka & Magdy, 2011, p. 595).

- *Reducción del efecto isla de calor:* En las zonas urbanas, el efecto isla de calor puede causar una temperatura de 2 a 5°C mayor que en las zonas rurales debido al empleo de superficies con un alto albedo. Con la implementación de MV, una gran cantidad de radiación solar puede ser absorbida para el crecimiento de las plantas y sus funciones biológicas. Entre el 5 y el 30% de la radiación solar restante atraviesa las hojas, afectando el clima interno del edificio (Perini et. al., 2011^a, p. 5). Esto quiere decir que puede absorber hasta un 70% de la radiación solar.

- *Reducción de la temperatura y ahorros energéticos en edificios:* El efec-

to de la evapotranspiración y sombreado que generan las plantas puede reducir significativamente la cantidad de calor que puede ser re-irradiada por las fachadas u otras superficies duras. Estos efectos también influyen en el microclima interior y exterior del edificio. En consecuencia, especialmente en climas más cálidos, el potencial de enfriamiento puede generar ahorros energéticos significativos para el aire acondicionado. Estudios revelan que la reducción de temperatura puede ser en de 2 a 6°C (*ibid.*, p. 5) Diferentes variables como como el tipo de sistema empleado, el tipo de clima, estaciones del año, orientaciones, tipo de especie utilizada y el grosor del follaje, así como los efectos de sombra, enfriamiento, aislamiento y barreras de viento, deben de ser considerados para evaluar la contribución de los MV como sistema pasivo hacia el ahorro energético en edificios. Pocos estudios se han realizado alrededor del mundo, por lo que es necesaria mayor investigación, (experimentación, simulaciones energéticas y casos reales), sobre todo en zonas que reciben mayor radiación ya que pueden resultar más eficaces, (Pérez et. al., 2014).

- *Incidencia del viento sobre la edificación:* La presencia de vegetación genera brisas que refrescan el ambiente y a su vez, reducen la velocidad del viento alrededor de las fachadas del edificio debido al follaje y al tipo de materiales empleadas en los diferentes sistemas. También se logra reducir la transmisión térmica hacia el edificio, implicando ahorros energéticos debido a la capacidad de enfriamiento de los edificios que emplean MV

(Perini et. al., 2011^b).

- *Reducción del ruido ambiental y absorción del sonido:* La vegetación pueden absorber, reflejar y difractar ruido, lo cual puede generar un espacio más confortable en zonas urbanas. La eficiencia va a depender del tipo de planta, densidad, ubicación y frecuencia de sonido (Ottelé, 2011, p. 42). De acuerdo a experimentos realizados por Wong, et. al., (2010, p. 1) con diferentes tipos de MV, se mostró una atenuación significativa en frecuencias medias y bajas debido al efecto de absorción principalmente de los sustratos, mientras que una atenuación menor se pudo observar en frecuencias altas debido a la dispersión en el follaje. Esto quiere decir que los sustratos son los que más contribuyen a la atenuación del sonido.

- *Generación de biodiversidad:* Los MV puede beneficiar la restauración de fauna silvestre dentro de los ambientes urbanos como pájaros, mariposas o escarabajos, si se escoge cuidadosamente la especie de plantas que genera mayor atracción hacia estos. (Timur, & Karaca, 2013, p. 604). Por otro lado, estudios sugieren que los beneficios psicológicos aumentan al tener mayor biodiversidad en los espacios verdes (Fuller et. al., 2007, p. 329).

- *Beneficios Sociales:* Los MV generan un alto potencial estético que impacta en la percepción de los espacios, a la vez que crean una relación

cercana entre las personas y su entorno, lo que se traduce en una mayor apropiación del mismo (Buraglia, 2011, p. 63). Las personas suelen sentirse mejor en un ambiente verde debido a nuestro sentido de conexión con la naturaleza y con otras formas de vida. Este fenómeno es llamado biofilia y sugiere que las personas se sienten mejor con algo que está vivo. Así mismo, se ha demostrado que las plantas tienen un efecto en la salud humana, lo cual puede acelerar la velocidad de recuperación de los pacientes y reducir el estrés. (Ottelé, 2011, p. 53). Otros autores sugieren que el uso de MV puede reducir los actos vandálicos como el uso de grafitis en las fachadas de los edificios (Navarro 2013, p. 67).

- *Beneficios económicos:* Los beneficios económicos más relevantes están relacionados con los ahorros energéticos del aire acondicionado, durabilidad de las fachadas lo cual reduce la cantidad de mantenimiento requerido, así como un aumento en el valor de la propiedad. Los MV puede ser un negocio atractivo si los beneficios sociales fueran considerados por los gobernantes al proveer de incentivos que redujeran los costos iniciales de instalación. Esto generaría un aumento en cuanto a la sustentabilidad económica de los sistemas y a su vez aumentaría su difusión. (Perini, & Rosasco 2013).





2.2 CLASIFICACIÓN DE LOS MUROS VERDES

Los MV se pueden clasificar en dos tipos; fachadas verdes y sistema de muro viviente (Manso & Castro, 2015). Los beneficios ecológicos y ambientales pueden variar en mayor o menor medida, de acuerdo al tipo de sistema implementado.

1- *Fachadas verdes*: Están basadas en la aplicación de plantas trepadoras o colgantes que se desarrollan a lo largo del muro. Se pueden clasificar en directas o indirectas:

- a) *Directas*: En donde las plantas están unidas directamente al muro. En éstas se pueden incluir los sistemas tradicionales en donde la planta está enraizada en el suelo y se adhieren al muro para trepar.
- b) *Indirectas*: Incluyen una estructura de soporte para la vegetación como guías continuas que direccionan el desarrollo de la planta sobre la superficie ó a través de enrejados.

2- *Muro viviente*: Éstas son de recién creación en el ámbito de revestimiento de paredes. Surgieron para permitir la integración de MV para edificios más altos. Se pueden clasificar en continuos o modulares, de acuerdo a su método de aplicación.

- a) *Continuos*: Están basados en el uso de pantallas permeables y aligeradas en donde las plantas son insertadas de manera individual. Son



Figura 7. Fachadas Verdes: 1)Directas, 2)Indirectas, Muros vivos: 3) Continuos 4) Modulares, a) jardineras b) bandejas c) bolsas flexibles
Fuente: Adaptado de Perini et al, (2011^a)

también conocidos como jardines verticales, un nombre dado por el botánico francés Patrick Blanc quien reportó el primero en su tipo en 1994.

b) Modulares: Son elementos de una dimensión específica que incluye el medio de crecimiento de las plantas. Cada elemento es soportado por una estructura complementaria o fijada directamente en la superficie vertical. Estos varían en composición, peso y ensamblaje. Pueden estar en forma de jardineras, bandejas, en maceteros tipo baldosa o bolsas flexibles:

- En jardineras: Son comúnmente contenedores rígidos, fijados entre sí que pueden soportar la planta y el peso del sustrato.
- En bandejas: Son una adaptación del soporte más común para plantas con la diferencia que pueden sujetarse a una estructura vertical o unidas entre sí de manera vertical
- En módulo tipo baldosa: Éstas resaltan la forma del elemento modular como elemento de diseño para el exterior del edificio o revestimiento interior.
- En bolsas flexibles: Incluyen un medio de soporte y materiales ligeros que permiten la aplicación de vegetación en las superficies con diferentes formas, por ejemplo curvadas o superficies inclinadas

2.3 COMPONENTES DEL SISTEMA

Se han desarrollado diferentes configuraciones de MV, los cuales varían de acuerdo al tipo de soporte utilizado, medio de crecimiento, tipo de vegetación y sistema de drenaje e irrigación (*ibid.*):

A. Elementos de soporte

1- Fachadas verdes

- a) Directas: No requieren ningún soporte. Se basan en la capacidad de las plantas trepadoras capaces de adherirse a las superficies verticales.
- b) Indirectas: Funcionan como una doble piel, creando una capa de aire entre la superficie del edificio y la vegetación. La aplicación de una estructura de soporte evita que la vegetación se caiga. La estructura de soporte pueden ser guías como cables, alambres o enrejados de acero galvanizado o acero inoxidable.

2- Muros vivientes

- a) Continuos: Se instalan por medio de un marco fijado al muro, formando un espacio vacío entre el sistema y la superficie. Este marco sostiene el panel base que ayuda a proteger al muro de la humedad, mismo que es cubierto con capas permeables, flexibles y pantallas a prueba de raíz, engrapadas en la base. La capa externa de la pantalla es cortada para formar bolsas para introducir las plantas individualmente.





b)Modulares: Se componen de interconexiones para unirse entre ellos. Están hechos con base en materiales ligeros como plásticos (polipropileno o poliuretano), o laminas metálicas (aluminio, acero galvanizado o acero inoxidable). Pueden contener una cubierta formando una red para prevenir que las plantas se caigan.

- Bandejas y recipientes: Son normalmente fijadas a un marco vertical u horizontal que se ancla a la superficie. La superficie posterior puede incluir ganchos o soportes de montaje para su suspensión en los marcos conectados a la superficie vertical.
- Maceta tipo baldosa: Dependiendo del sistema, pueden estar adheridas a la superficie vertical o fijados con sujeción mecánica. Incluyen una parte trasera plana fijada a la superficie del edificio.
- Bolsas flexibles: Son llenadas con medio de cultivo, hecho de materiales poliméricos flexibles que se cortan para insertar cada planta

B. Medio de crecimiento: Sólo los sistemas modulares requieren de un medio de crecimiento el cual debe ser de peso ligero, considerando que cada elemento estará suspendido y adaptado a la planta elegida. Los sistemas continuos como los hidropónicos, no contiene sustrato, por lo que requieren de un suministro constante de agua de nutrientes.⁶

6- Las plantas requieren muchos nutrientes, principalmente Potasio (K), Fósforo (P), Azufre (S), Magnesio (Mg), y Nitrógeno (N). Paralelamente las plantas necesitan también elementos como el Zinc, Boro y Selenio (Minke & Peterssen, 2014).

C. Vegetación: Para alcanzar los objetivos de sustentabilidad, la vegetación debe tener bajos requerimientos de irrigación y tener la capacidad de adaptarse a las condiciones climáticas como lo hacen las plantas nativas. Las fachadas verdes directas e indirectas ocupan plantas trepadoras, lo que limita la cantidad de especies posibles de ocupar. Por otro lado, se deben de considerar sus limitaciones de crecimiento ya que algunas especies sólo alcanzan 5 o 6 m, mientras que otras 25 m y tardan en 3 a 5 años en cubrir las superficies. En cambio los muros vivos permiten generar conceptos más estéticos, utilizando mayor variedad de especies, explorando el uso de patrones, colores, texturas, follaje formas, densidad y crecimiento. Aun así, los sistemas modulares tienden a generar un aspecto muy geométrico al momento de colocar las plantas, (Navarro 2013). En cambio los sistemas hidropónicos hacen posible el uso de una mayor variedad de plantas en diferentes estados de desarrollo: plantas cultivadas, esquejes o semillas. Nuevos conceptos de MV consideran la integración de vegetales y de hierbas aromáticas para generar agricultura urbana, incrementando el potencial funcional de los sistemas para los usuarios de los edificios.

D. Drenaje: El drenado se lleva a cabo por gravedad. En los sistemas continuos, se utilizan geotextiles que promueven el drenado a través de la membrana permeable. En los sistemas modulares, se toma ventaja de la superposición de ellos mismos para que el exceso de agua se reúse en el

módulo inferior.

E. Irrigación: Los requerimientos de irrigación dependen del tipo de sistema y las condiciones climáticas. El suministro de agua es a través de un tubo localizado en la parte superior que conecta con el sistema de irrigación principal, en donde el agua se distribuye uniformemente a través de la pantalla permeable, en el caso de los sistemas continuos. En los sistemas modulares, algunos incluyen un hueco para insertar el tubo de irrigación y hoyos de drenado en el fondo. También se instala un canal en la base para recuperar el exceso de agua para reintroducirlo al sistema de irrigación. Algunas estrategias empleadas para minimizar el consumo de agua es recuperar el agua de lluvia y el monitoreo de requerimientos de agua por medio de la instalación de sensores que controlan los niveles del tanque de agua, el tiempo de irrigación y condiciones climáticas, como cantidad de agua de lluvia, humedad, temperatura y presión atmosférica, así como evaluar los requerimientos de nutrientes.





03

LA INTEGRACIÓN DE LOS HUMEDALES
ARTIFICIALES Y MUROS VERDES;
EL VERDEM





De acuerdo a la investigación realizada, los HA son sistemas de tratamiento secundario viables de implementar debido a sus bajos costos de operación y mantenimiento, y eficiencia en cuanto a remoción de contaminantes. De acuerdo a los tipos de HA revisados, el HAFVSS resulta ser el más eficiente de todos para tratar agua gris, ocupando una menor cantidad de superficie de suelo. Esto en función a los estudios e implementaciones realizadas en diferentes países, los cuales lo han adoptado como sistema descentralizado en viviendas.

Por otro lado, los MV se han convertido en una respuesta a la integración de espacios verdes en zonas urbanizadas, en donde se aprovechan las superficies verticales, lo cual genera una serie de beneficios ambientales que se refleja en la calidad de vida de la población. De los tipos de MV existentes, los sistemas modulares, ofrecen mayores ventajas ambientales debido a su resistencia térmica y reducción de velocidad del viento por la capa de materiales involucrados. A esto se le puede agregar su posibilidad de aislamiento acústico, debido al uso de sustratos, que pueden absorber en mayor medida el sonido en comparación de otros MV.

Con base a lo anterior, se propuso la integración de ambas tecnologías para crear un sistema de tratamiento de agua gris descentralizado para vivienda, que forme parte de la envolvente. Para tal efecto, un HAFVSS puede ser adaptado para que aproveche las superficies verticales del mis-

mo modo que un MV. La integración resulta coherente debido a los componentes que tienen en común, como el uso de sustratos y de plantas, además de funcionar con base en un flujo de agua que cae por gravedad para alimentar a las plantas y absorber nutrientes. De esta manera, los costos de suministro de nutrientes en los MV podrán desaparecer ya que el agua gris contendría los nutrientes necesarios. Con esto, se le estaría agregando una función adicional a los MV, que es la capacidad de tratar agua en sitio. Para efectos de esta investigación, la integración de ambos sistemas se le ha designado el nombre del VERDEM.

3.1 INVESTIGACIONES PREVIAS REFERENTE A LA INTEGRACIÓN DE LOS SISTEMAS

Pocos estudios se han realizado con referencia a los MV como sistema de tratamiento de agua. A continuación se muestran los casos existentes:

Masi *et. al.*, (2015), proponen un sistema de tratamiento de aguas grises a partir de dos unidades de MV. Cada unidad consiste en una estructura metálica autoportante que es colocada a nivel de piso e independiente a la fachada, que soporta 24 marcos modulares de 45 cm x 15 cm que sujetan 3 macetas pequeñas. El afluente fue recolectado en dos tanques de 100lts cada uno, con trampa de grasas como sistema de pretratamiento (Masi *et. al.*, 2016^b). La alimentación al sistema fue de 10 L/h, controlado





por una válvula solenoide con temporizador. Para el sistema de drenado se utilizó una tubería vertical que descarga el agua tratada a un canal colocado en la parte inferior de las unidades. El experimento se dividió en dos fases; en la primera se ocupó barro expandido como sustrato, en donde se observó una eficiencia de remoción promedio del 18% para la DQO y 24% para la DBO_5 . Debido a un bajo desarrollo de la biopelícula en el medio por una percolación rápida que no permitió un tiempo de retención adecuado, y un bajo contenido en nutrientes en el efluente. En la segunda fase se utilizó barro expandido mezclado con fibra de coco en una unidad y barro expandido mezclado con arena en la otra unidad. En este se observó una remoción promedio del 60% y 30.1% respectivamente para la DQO y 62.6% y 41.1% para la DBO_5 . El sistema se diseñó para tratar de 125 L a 250 L por día (*ibid.*). La calidad de agua arrojada en la Fase 1 fue adecuada para reúso en riego según las regulaciones de la India. La de la Fase 2 fue adecuada para reúso en descarga de inodoro, empleando adicionalmente una desinfección a base de rayos ultravioleta. Las plantas empleadas fueron Abelia, Wedelia Portulaca, Alternanthera, Duranta y Hemigraphis.

Perc, M. N. (2014), desarrolló un prototipo de MV para tratamiento de aguas grises en Eslovenia que llamó "The Soft Machine garden". Consiste en paneles modulares tipo baldosa de 1 m x 1 m aproximadamente, los cuales fueron colocados bordeando un jardín. El agua es ingresada gra-

cias a una bicicleta fija que las personas pedalean para bombear el agua hacia la parte superior del sistema modular. Sus estimaciones promedian un tratamiento de 25 L/m²/día. Sus conclusiones estiman que se requieren 5 m²/hab. de muro verde. No se ofrecen mayores datos técnicos con respecto al sistema ni información referente al desempeño del sistema para la remoción de contaminantes ni el tipo de plantas empleadas.

Svete (2012) propuso un sistema de tratamiento de aguas grises con base en el funcionamiento de un filtro intermitente de arena que fue adaptado a un sistema vertical el cual fue instalado en la Universidad Noruega de Ciencias de la Vida. Para esto, construyó un muro de 1.75 m de alto por 40 cm de ancho por 2 m de largo, con una saliente en la parte inferior como zona de desagüe, a base de madera contrachapada el cual rellena de barro expandido como sustrato de diferentes granulometrías divididas por capas acomodadas verticalmente. El muro fue dividido en tres secciones verticales (A,B, y C), cada una cubierta en la parte frontal de diferentes materiales (A, plástico y madera contrachapada, B, geotextil c/malla de acero, C, geotextil, malla de acero y 5 macetas distribuidas verticalmente como salientes en donde se cultivaron plantas comestibles). El efluente se ingresó por medio de aspersores, por la parte superior. Se recolectaron varias muestras de agua en cada sección posicionado puertos de salida de agua a diferentes alturas. La eficiencia de remoción de contaminantes promedio para DBO_5 fue de 95%, 97% y 98% para secciones A, B y

C, respectivamente, mientras que para la DQO fue de 82%, 85% y 88% para A, B y C respectivamente. De manera general concluye que la remoción de contaminantes del sistema está dentro de los intervalos esperados en comparación con el desempeño de un filtro biológico de agua gris a pesar de que se recolectaron las muestras en etapa temprana, (después de 11 semanas), y pesar de tener una carga hidráulica alta ($650-1000 \text{ l/m}^2/\text{d}$). También se menciona que las muestras obtenidas de la sección en donde fueron cultivadas las plantas, no presentaron mayor remoción de contaminantes que las otras dos, en donde no se utilizaron plantas. Además se indica que en un área de 1 m^2 es suficiente para tratar agua de 4 personas considerando que su producción de agua es de 100 L/día .

Sakkas, P. (2012) propuso el diseño de un sistema de tratamiento de aguas grises a partir de un muro verde con base en un sistema modular. Cada módulo tiene 57.5 cm de alto x 34.5 cm de largo x 25.5 cm de ancho los cuales pueden ser ensamblados unos con otros de manera horizontal y vertical. Propone unidades de 6 módulos en fila y 4 en columna, en donde el módulo inferior soporta el peso de los 5 colocados arriba de éste. Así, el módulo 6 se sujeta a una estructura metálica anclada a la fachada y a la altura de la losa. El ingreso de agua es por la parte superior, y recolectada por medio de un canal en la parte inferior de cada unidad. Se sugiere que el material de los módulos sea de Polietileno de Alta Densidad por su resistencia y rigidez, utilizando espesor mayor en la cara trasera.

El módulo representa una sección típica de un HAFVSS, de acuerdo al diseño que dictan las Regulaciones de Edificación de Reino Unido, pero en escala menor. Se replican las capas sustituyendo el tipo de sustratos típicos por unos más ligeros. Se propone utilizar un tapete de capilaridad como primera capa, una segunda capa de barro expandido, una tercera capa de grava de vidrio expandido y finalmente, una lámina de drenaje de polietileno en la parte inferior. Así mismo, se analiza el tipo de plantas típicas de un humedal, para identificar las plantas de menor crecimiento, eligiendo la especie Carex. Su solución prevé tratar hasta 105.6 L/día de agua gris en 4.2 m^2 (24 módulos). El peso final del sistema en condiciones saturadas de agua es de 318 kg/m^2 . Concluye que se deberá de verificar la habilidad de tratamiento del sistema, ya que no se construyó. Además se recomienda optimizar el tamaño, peso y forma del módulo propuesto para una mejor integración y ligereza.

De acuerdo a los estudios realizados, se puede percibir que aún se requiere mayor investigación en el tema, en donde se propongan diseños que logren eficientar el sistema de tratamiento en cuanto a producción y calidad de agua, experimentando con diferentes sustratos, plantas y medio de almacenamiento.



3.2 EL VERDEM Y LA SELECCIÓN DE CRITERIOS DE LA NMX-AA-164-SCFI-2013 Y EL PAAS

El VERDEM resulta en una tecnología con alto potencial para contribuir al cumplimiento de diferentes criterios establecidos en los programas y normas de edificación sustentable de México debido a los beneficios ambientales que puede ofrecer. Para efectos de esta investigación, se analizaron los criterios del PAAS, y de la norma NMX-AA-164-SCFI-2013-Edificación Sustentable- Criterios y Requerimientos Ambientales Mínimos.

La norma NMX-AA-164-SCFI-2013, especifica los criterios y requerimientos ambientales mínimos aplicables a las edificaciones y sus obras exteriores, ya sea individuales o en conjuntos de edificios, nuevas o existentes, sobre uno o varios predios, en arrendamiento o propias. En esta, los criterios establecidos se manejan por incisos. La Tabla 4 muestra que los incisos se dividen en cinco categorías. Del total de incisos, unos son obligatorios y otros opcionales dependiendo si es edificación nueva o existente.

Tabla 4. Categorías de la norma NMX-AA-164-SCFI-2013

Fuente: Elaboración propia

| Categorías | Total de incisos | Criterios que corresponden | | | |
|---|------------------|----------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| | | Edificio existente | | Obra nueva | |
| | | Obl. ^a | Opc. ^b | Obl. ^a | Opc. ^b |
| 1. Suelo | 18 | 5 | 10 | 7 | 11 |
| 2. Energía | 17 | 11 | 6 | 13 | 4 |
| 3. Agua | 18 | 10 | 4 | 13 | 4 |
| 4. Materiales y Residuos | 19 | 5 | 12 | 6 | 12 |
| 5. Calidad de ambiente y responsabilidad social | | | | | |
| 5.1 Biodiversidad | 11 | 5 | 4 | 6 | 5 |
| 5.2 Paisaje | 8 | | 6 | | 7 |
| 5.3 Calidad de ambiente interior | 12 | 2 | 9 | 2 | 10 |
| 5.4 Responsabilidad social | 8 | 3 | 5 | 3 | 5 |
| Total | 111 | 41 | 56 | 50 | 58 |

^a Indica criterio obligatorio

^b Indica criterio opcional

Tabla 5. Categorías del PAAS

Fuente: SEDEMA, (2012)

| Criterios | No. de Criterios | Máximo de puntos |
|---|------------------|------------------|
| 1. Energía | 8 | 40 |
| 2. Agua | 5 | 25 |
| 3. Residuos Sólidos | 7 | 10 |
| 4. Calidad de vida y responsabilidad social | 11 | 25 |
| 5. Impacto ambiental y otros impactos | 13 | 20 |
| Total | 44 | 120 |

El PAAS presenta criterios de sustentabilidad aplicables a edificios destinados a un uso habitacional u oficinas y que estén en desarrollo o en operación. Los criterios se clasifican en cinco categorías. La certificación es expedida de acuerdo al grado de cumplimiento de los criterios, mediante tres tipos de certificación; Cumplimiento (21 a 50 puntos), Eficiencia (51 a 80 puntos) y Excelencia (81 a 100 puntos). En la Tabla 5 se muestran las categorías, número de criterios y el máximo de puntos posibles por cada

categoría. Los puntos pueden variar dependiendo del criterio y si es para vivienda u oficina en desarrollo, o vivienda u oficina en operación.

La norma NMX-AA-164-SCFI-2013, especifica los criterios y requerimientos ambientales mínimos aplicables a las edificaciones y sus obras exteriores, ya sea individuales o en conjuntos de edificios, nuevas o existentes, sobre uno o varios predios, en arrendamiento o propias. En esta, los criterios establecidos se manejan por incisos. La Tabla 5 muestra que los incisos se dividen en cinco categorías. Del total de incisos, unos son obligatorios y otros opcionales dependiendo si es edificación nueva o existente.

Analizando detalladamente los criterios con las que puede contribuir el VERDEM, se pudieron identificar 8 en el PAAS y 13 de la norma NMX-AA-164-SCFI-2013. Por considerarse una lista muy extensa de estudiar, se propuso analizar sólo algunos de ellos en esta investigación, los cuales se muestra en la Tabla 6.

Tabla 6. Criterios identificados con los que puede contribuir el VERDEM

Fuente: Elaboración propia

| Criterios del PAAS | | Criterios de la NMX-AA-164-SCFI-2013 | |
|--|-------------------|--------------------------------------|------------|
| Energía | *PCES-ENER-I.1.1. | Energía | *5.2.2.1 |
| | PCES-ENER-I.1.2 | | 5.2.2.2 |
| Agua | PCES-AG-II.1.1. | | *5.2.3.2 |
| | *PCES-AG II.2.1. | Agua | 5.2.3.5 |
| | | | *5.2.3.7 |
| Calidad de Vida y Responsabilidad Social | *PCES-CV-IV.1. | | *5.2.3.16 |
| | PCES-CV-IV.5. | Biodiversidad | 5.2.5.1.5 |
| | | | *5.2.5.1.8 |
| | *PCES-CV-IV.9. | | *5.2.5.1.9 |
| Impacto Ambiental y Otros Impactos | PCES-IA-V.3. | Paisaje | *5.2.5.2.1 |
| | | | 5.2.5.2.2 |
| | | | *5.2.5.2.6 |
| | | Calidad del Ambiente Interior | 5.2.5.3.1 |

* Indica los criterios seleccionados para evaluar en esta investigación

04

EL DISEÑO DEL VERDEM Y PROCESO
DE EXPERIMENTACIÓN





4.1 DISEÑO DEL SISTEMA MODULAR

Para llevar a cabo el proceso de experimentación, se diseñó y construyó el VERDEM compuesto de cinco módulos de acrílico. Dichos módulos fueron diseñados para que se ensamblaran uno sobre otro; cada módulo fue fijado de manera independiente al muro utilizando taquetes de expansión.

4.1.1 Forma y materiales empleados

Se diseñó un módulo tipo jardinera de forma rectangular de 400 mm de alto y 600 mm de largo por 150 mm de ancho, para obtener una altura total de 2000 mm después de ensamblar cinco módulos en torre.

Para lograr un ensamble de un módulo con otro, se le agregó una base de 50 mm de alto capaz de remeterse y embonar en la parte superior del módulo que iría debajo de éste. Lográndose alinear los módulos en sentido vertical. El plano frontal del módulo se inclinó hacia enfrente para generar una abertura y permitir que las plantas sobresalieran. De este modo, se obtuvo una forma final con dimensiones de 15cm de ancho en la base inferior y un ancho en la parte superior de 300 mm, con un largo de 600 mm y profundidad de 400 mm, más 50 mm de base, (Figura 8). Cabe destacar que a comparación de los sistemas modulares disponibles

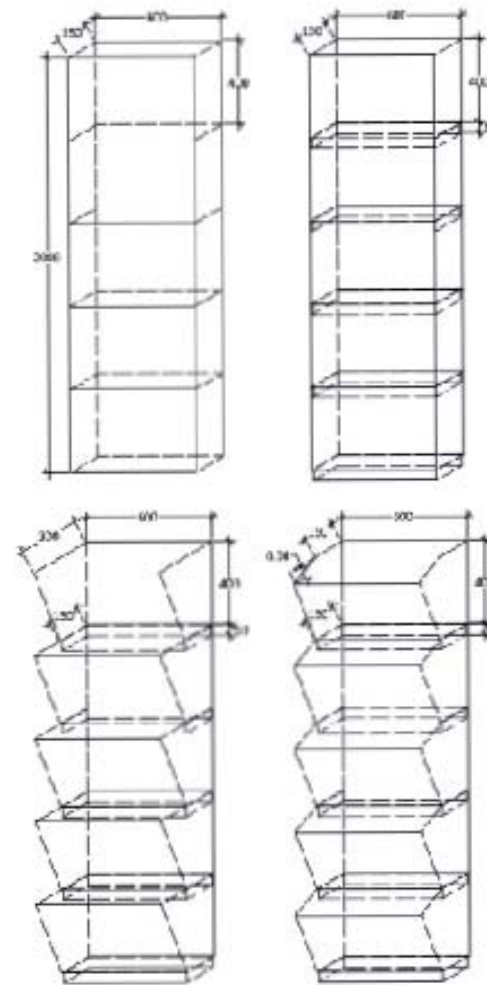


Figura 8. Proceso de diseño de la forma del sistema modular. Medidas en milímetros
Fuente: Elaboración propia



en el mercado mexicano,⁷ la profundidad designada fue para lograr las condiciones anaeróbicas en el fondo del módulo.

Se buscó un material fácil de conseguir, lo suficientemente rígido y liso de superficie para no facilitar la proliferación de hongos. Por ello se emplearon placas de acrílico de 3 mm para todas las caras, excepto la cara posterior que fue de 5 mm ya que ésta soportaría la mayor cantidad de peso al momento de fijarse al muro. El ensamble entre una cara y otra se logró gracias a que las orillas se cortaron de manera dentada para lograr así una mayor rigidez y área de contacto entre planos. Para evitar el pandeo en la cara frontal debido al peso, se le colocaron seis refuerzos horizontales distribuidos a lo alto, (Figura 9).

Todas las caras fueron cortadas mediante láser y una vez unidas, fueron adheridas con Ad-cryl. Las juntas se sellaron mediante SIKAFLEX 1^o, tanto en el interior como en el exterior para evitar fugas. A cada módulo se le colocó un tubo de PVC de $\frac{3}{4}$ " de \varnothing como preparación para el ingreso de agua de manera vertical, mismo que fue perforado @ 6cm con una broca de 2.5 mm. Así mismo, se le colocó una reducción de PVC de 1x $\frac{3}{4}$ " a la que se le adhirió una malla de plástico en uno de los extremos. A la reducción se le derivó un tubo de PVC $\frac{3}{4}$ " de \varnothing , como

7-En este punto se pueden mencionar el sistema modular que maneja Alux de México, que mide 25cm de profundidad por 30cm de largo por 20cm de ancho, y el sistema modular de la marca Minigarden® que es de 21cm de profundidad por 64 de largo por 15cm de ancho

preparación para la salida de agua en la parte inferior derecha, (Figura 10).

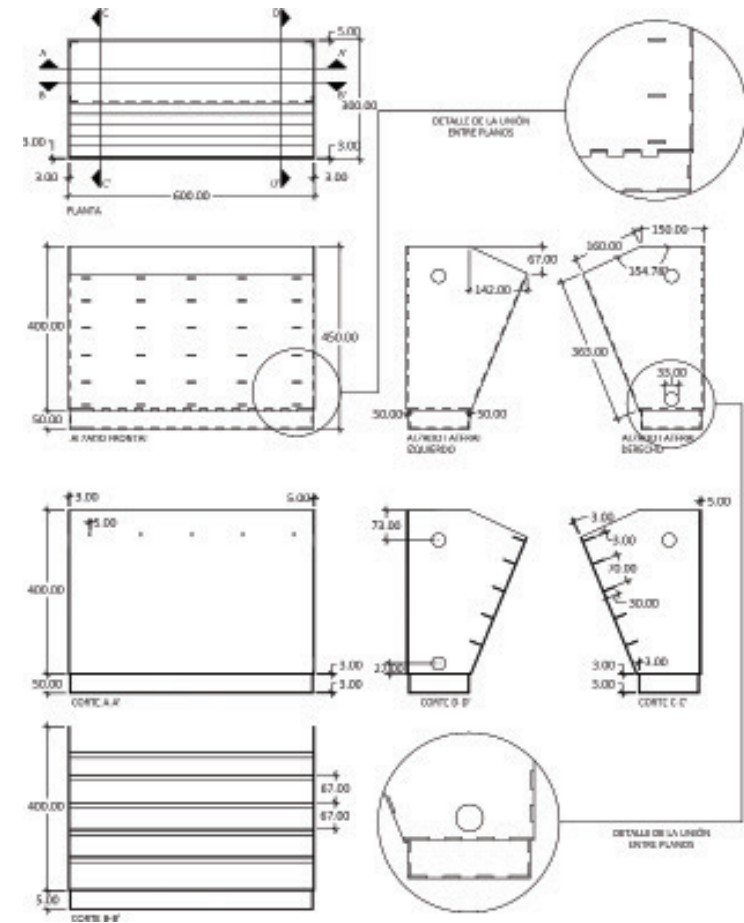


Figura 9. Dimensiones finales del módulo empleando placas de acrílico de 3 y 5mm. Medidas en milímetros.

Fuente: Elaboración propia



Figura 10. Módulo de acrílico con preparaciones de PVC
Fuente: Elaboración propia



Figura 11. Módulo fijado a muro a base de taquetes y escuadras unión
Fuente: Elaboración propia

4.1.2 Sistema de fijación a muro

Para reducir la cantidad de elementos a emplear y a su vez los costos, se diseñó el sistema para que cada módulo fuera fijado directamente al muro mediante cinco taquetes de pared hueca de $3/16''$, distribuidos de manera horizontal a 6cm por debajo del borde superior de la cara trasera. Adicionalmente se colocó una arandela de hule entre el muro y el módulo para reducir la fricción de ambas superficies, mientras que en la cara interior del acrílico se empleó una arandela metálica. Para evitar riesgos de vencimiento por peso s extremos, se agregaron dos escuadras unión de $2\frac{1}{2}'' \times 2\frac{1}{2}''$, una en cada lado, fijada al muro con taquetes, y fijada al módulo con un tornillos de cabeza redonda de $\frac{1}{4}'' - 20 \times \frac{3}{4}''$ (Figura 11).

4.2 PROCESO DE EXPERIMENTACIÓN

El proceso de experimentación se llevó a cabo en la Facultad de Estudios Superiores Aragón en el jardín del Centro Tecnológico, el cual se dividió en dos fases; la primera consistió en la elección del sustrato adecuado con base en el análisis de muestras de calidad de agua del afluente, que fueron recolectadas de tres módulos – humedal, en el que cada uno de ellos tiene un tipo de sustrato, pero la misma especie de planta *Zantedeschia aethiopica* en todos los casos. En la segunda Fase, se procedió a montar el sistema modular diseñado en este trabajo, utilizando el sustrato elegido y empleando cuatro especies de plantas distintas.

4.2.1 Fase 1 - Elección de sustrato a emplear

4.2.1.1 Sustratos identificados

Se identificaron los sustratos disponibles en los mercados de plantas más conocidos de la región⁸ y se seleccionaron aquellos que fueran inertes para que no absorbieran ni suministraran nutrientes para no intervenir en las reacciones microbianas del HA. En la Tabla 7 se muestra la relación de sustratos encontrados y sus características más importantes.

De los sustratos encontrados se eligió el tepojal, la vermiculita y la perlita por ser los tres más ligeros ya que era importante considerar que el peso final de cada módulo debía de ser lo más ligero posible. En cuanto a la arena de río y la grava, no se consideraron ya que las características de estos desfavorecen el criterio de selección.

4.2.1.2 Plantas identificadas

Debido a la dimensión del módulo diseñado, se buscaron especies de menor tamaño a las que comúnmente son empleadas dentro de los HA. Se inició identificando especies ornamentales que hayan sido empleadas en HA anteriormente y que además pudieran ser encontradas dentro de los mercados de plantas más conocidos de la región.

⁸- Los mercados de plantas a los que se hacen referencia son; El mercado Madreselva de Xochimilco, el mercado de plantas Cuemanco y los Viveros de Coyoacán.

Tabla 7. Sustratos identificados

Fuente: Adaptado de Infoagro (2016), Hydro Environment (2016), Ferrex, (2016)







| No. | Imagen | Características |
|-----|---|---|
| 1 |  | Nombre: Arena de río Densidad: 1.50 g/cm ³ Tamaño: 0.5 - 2mm |
| 2 |  | Nombre: Grava Densidad: 1.50 - 1.80 g/cm ³ Tamaño: 5 - 15 mm |
| 3 |  | Nombre: Tezontle Densidad: 1.20 - 1.60 g/cm ³ Tamaño: 5 -15 mm |
| 4 |  | Nombre: Tepojal Densidad: 0.40 g/cm ³ Tamaño: 5 -15 mm |
| 5 |  | Nombre: Vermiculita Densidad: 0.085 - 0.09 g/cm ³ Tamaño: 4 mm |
| 6 |  | Nombre: Perlita Densidad: 0.05 - 1.25 g/cm ³ Tamaño: 1.5 -2.3 mm |

Tabla 8. Especies identificadas en mercado de plantas empleadas en Humedales Artificiales

Fuente: Elaboración propia







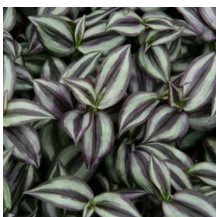
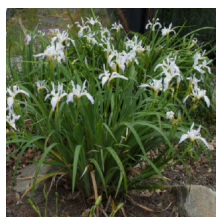

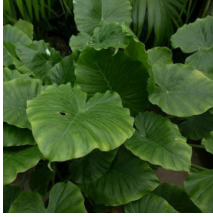




| Imagen | Características* | Imagen | Características* |
|---|---|---|---|
|  | Inv. de referencia: 1 Nombre científico: <i>Syngonium podophyllum</i> ^a Nombre común: Singonio Altura: 0.40 a 0.55m Floración: No Exposición: Sol o media sombra |  | Inv. de referencia: 3 Nombre científico: <i>Anturium andreaeanum</i> ^h Nombre común: Cala Altura: 0.3 a 0.40m Floración: Otoño Invierno Exposición: Exposición: Sol |
|  | Inv. de referencia: 1 Nombre científico: <i>Scindapsus aureus</i> ^b Nombre común: Poto Altura: 0.15 a 0.20m Floración: No Exposición: Media sombra o sombra |  | Inv. de ref: 3, 4 y 5 Nombre científico: <i>Zantedeschia aethiopica</i> ^l Nombre común: Alcatraz Altura: 0.30 a 0.60m Floración: Verano Otoño Invierno Exposición: Sol o media sombra |
|  | Inv. de referencia: 1 Nombre científico: <i>Iresine herbstii</i> ^e Nombre común: Iresine rastrera Altura: 0.25m Floración: No Exposición: Sol, media sombra |  | Inv. de ref: 4 Nombre científico: <i>Spathiphyllum wallisii</i> ⁱ Nombre común: Cuna de Moisés Altura: 0.30 a 0.60m Floración: Verano Exposición: Media sombra o sombra |
|  | Inv. de referencia: 2 Nombre científico: <i>Tradescantia zebrina</i> ^d Nombre común: Tradescantia morada Altura: 0.20 a 0.30m Floración: Primavera verano Exposición: Sol |  | Inv. de referencia: 4 y 6 Nombre científico: <i>Iris japonica</i> ^k Nombre común: Lirio persa Altura: 0.60 a 0.80m Floración: Primavera Exposición: Sol o media sombra |

Tabla 8. Continuación

| Imagen | Características* | Imagen | Características* |
|--|--|--|--|
|  | Inv. de referencia: 2 Nombre científico: <i>Nephrolepis exaltata</i> ^e Nombre común: Helecho boston Altura: 0.20 a 0.40cm Floración: No Exposición: Sol o media sombra |  | Inv. de ref: 4 Nombre científico: <i>Alocasia sp.</i> ^l Nombre común: Hoja elegante Altura: 0.50 a 1.20m Floración: No Exposición: Sombra o media sombra |
|  | Inv. de referencia: 3 Nombre científico: <i>Agapanthus africanus</i> ^f Nombre común: Lirio africano Altura: 0.40 a 1.80m Floración: Sin periodo definido Exposición: Sol |  | Inv. de ref: 4 Nombre científico: <i>Cyperus papyrus</i> ^m Nombre común: Papiro Altura: 0.50 a 0.70cm (Papiro Enano) Floración: Primavera, Verano Exposición: Sol y media sombra |
|  | Inv. de ref: 7 Nombre científico: <i>Chlorophytum comosum</i> ^{fi} Nombre común: Malamadre Altura: 0.20 a 0.35m Floración: Verano Exposición: Sol o media sombra |  | Inv. de ref: 6 Nombre científico: <i>Acorus gramineus</i> ⁿⁱ Nombre común: Pasto acorus Altura: 0.15 a 0.25m Floración: No Exposición: Sol |

1- Liu, et, al. (2007), implementó un HAFV descendente y otro ascendente. En el primero se utilizaron diversas especies, entre estas "a", "b" y "c", y en el segundo se utilizaron plantas tradicionales de humedales. Las tres especies sobrevivieron durante el proceso de experimentación aunque no se desarrollaron bien, excepto la especie "c", la cual se encontró en buen estado al finalizar en proceso. Concluye que las plantas tradicionales tienen mayor de capacidad de remoción de contaminantes que las diversas (69% vs. 65.7% en DQO y 71.6% vs. 64.6% en DBO5), sin embargo se genera un paisaje mas monotono.

2- Domínguez, et, al, (2012), desarrolló un prototipo a micro escala de un HAFL en donde se utilizaron tres especies, entre estas "d" y "e". No presentan resultados de la capacidad de remoción de contaminantes de dichas especies.

Tabla 8. Continuación

3- Zurita, et. al. (2009), desarrollo un HAFVSS y un HAFHSS en donde se emplearon diferentes especies comerciales, entre ellas "f", "h" e "i". Esta última se desarrolló mejor en el del FH, mientras que las otras, en la de FV ya que desarrollaron mas hojas y flores excepto por "h" que murió durante el invierno. Concluye que la remoción de contaminantes fué significativamente mayor en el HAFVSS que en el HAFHSS (arriba del 80% en DBO y DQO), por lo que es posible utilizar plantas comerciales en HA, sin reducir la eficiencia del sistema de tratamiento.

4- Zuñiga, et. al. (2016), desarrolló un HA en donde se emplearon diversas especies ornamentales, entre ellas "g", "i", "j", "k" "l" y "m". Dentro de las especies empleadas, "m", fué la que mejor se adaptó debido a que generó raíces profundas, sin embargo todas crecieron bien excepto "k", ya que presentó poca adaptabilidad. Concluye que el sistema presentó buen desempeño en general, mismo que cumplió con los límites maximos permisibles de la NOM-003-ECOL-1997 y la USEPA 2004 para reúso de aguas residual tratada.

5- Belmont & Metcalfe, (2003), desarrolló un HAFSS a escala de laboratorio en donde se midió a eficiencia de remoción de contaminante de la especie "i", la cual se comparó con celdas en donde no se plantó ninguna especie. Concluye que "i" reduce significativamente el N, a comparación de la DQO y Nonylphenol Ethoxylates (NPEO).

6- Yuan, et. al. (2004) Construyó tres HASSFV para tratar agua residual doméstica utilizando tres especies; *Juncus effusus*, "k" y "m" y adicionalmente otro HA sin plantas como punto de comparación. Los HA con plantas tuvieron mejor remoción de contaminantes que la que no tenía. El HA con "m", tuvo mayor remoción que las otras dos especies (80.46% en DQO y 77.7% en NT). El HA sin vegetación tuvo menor remoción que las tres HA con plantas.

7- Jingping, et. al. (2009). Analizó la capacidad de "n" para un sistema de purificación de agua residual doméstica, en la cual se determinó que tiene una buena capacidad de remoción de COD, NT, KN, PT Y SS

* El intervalo de alturas se establecieron con base a un promedio de medidas realizadas dentro del mercado de plantas de Cuernavaca. En cuanto a las características adicionales, se consultaron las siguientes páginas web: <http://www.botanicayjardines.com>, <http://www.gardenmania.com>, <http://www.laguideplantas.com>, <http://articulos.infojardin.com>, <http://en.hortipedia.com> y <http://www.planthogar.net>

En la Tabla 8 se muestran las especies identificadas indicando la investigación de referencia en la que fueron empleada. Con base en dicha tabla anterior, se eligieron cuatro especies que resultaron efectivas dentro de las investigaciones de referencia, que además pudieran estar expuestas al sol y también fueran frondosas. En este sentido se eligieron las especies *Zantedeschia aethiopica*, *Chlorophytum comosum*, *Nephrolepis exaltata* y *Tradescantia zebrina*, las cuales además de la diversidad de texturas encontradas en estas, se lograría un muro verde atractivo estéticamente.

4.2.1.3 Empleo de módulos - humedal

Se emplearon tres módulos como medio de almacenamiento para generar tres humedales. En el H1 se utilizó vermiculita de 4 mm de Ø, en el H2 se utilizó perlita de 1.5 a 2.3 mm de Ø, y en el H3, tepojal de 1 a 5 mm de Ø. En cada uno se colocó una capa de drenado de 5cm de alto a base de tepojal de 1 a 3 cm de Ø. Al módulo 1 y 2, se le agregó una capa adicional de tepojal de 3 cm de alto, utilizando un Ø de 1 a 5 mm, para lograr que no se





filtraran los granos finos de la vermiculita y la perlita a la capa de drenado y obstruyeran la tubería de salida. Posteriormente se le colocó una capa de 20cm del sustrato correspondiente a cada humedal y finalmente se colocó una capa superior de tepojal de 2 cm, utilizando un \varnothing de 1 a 5 cm. Para limpiar los sustratos de material fino y obtener las granulometrías deseadas, los sustratos se tamizaron previamente en un tamizador de laboratorio marca Ro-Tap®.

En esta primera fase, se sembraron tres plantas de *Zantedeschia aethiopica* en cada uno de los humedales, para que no existiera variabilidad

en cuanto a la capacidad de absorción de contaminantes en cada humedal y se establecieron igualdad de condiciones en este aspecto. De esta manera la única variable diferente empleada fue el tipo de sustrato.

Previamente al sembrado, se lavaron las raíces de las plantas para que estuvieran libre de tierra y así evitar el riesgo de que esto obstruyera el tubo de salida. Las plantas se sembraron colocando la raíz por debajo del nivel de la capa superior y acomodándolas de manera diagonal para que sobresalgan en la abertura inclinada del módulo. La Figura 12 muestra las capas empleadas por cada humedal.

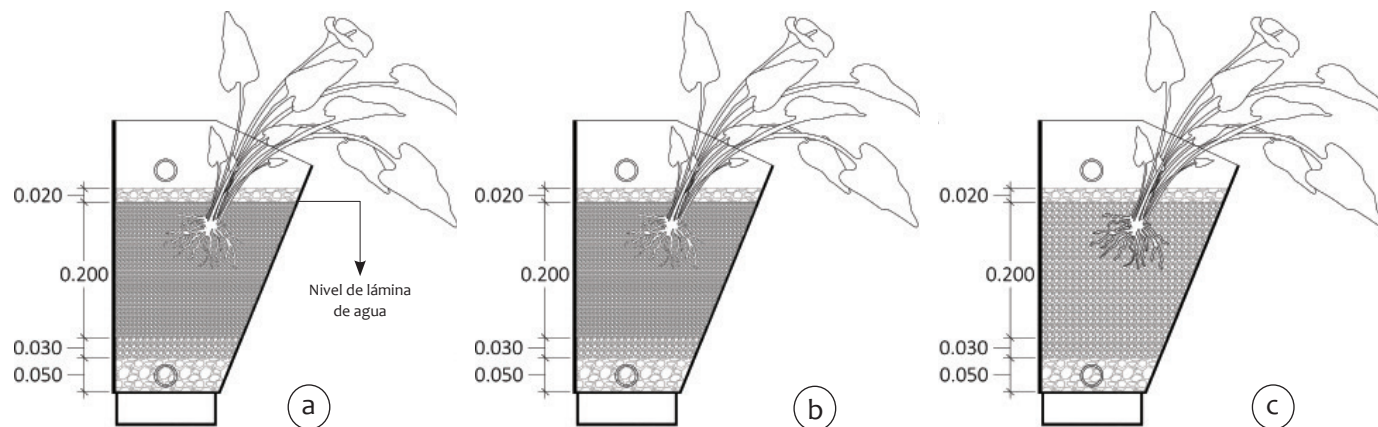


Figura 12. Corte lateral de módulos mostrando capas, a) H1- vermiculita, b) H2-Perlita, c) H3- tepojal
Fuente: Elaboración propia

4.2.1.4 Diseño hidráulico del módulo – humedal

Se utilizaron recipientes de plástico de 20 L de capacidad, colocado encima de un banco que superara la altura de los módulos. A cada recipiente se le hizo una perforación en una de sus caras laterales inferiores para derivar un tubo de ¾” de PVC, seguido de una válvula de paso para regular la velocidad del flujo del agua, y una serie de codos a 90° para alcanzar la altura del tubo horizontal de cada módulo. Se le agregó una tuerca unión previo a la conexión del tubo horizontal para permitir desconectar el módulo al finalizar la primera fase del experimento. De esta manera, el agua ingresaba a cada módulo por gravedad.

Para recolectar el agua de salida, se perforó un tapón de ¾” de PVC, mismo que se colocó después del tubo de salida del módulo. Con la perforación se permitió derivar una manguera opaca de pecera de 5mm de Ø, conectada a un recipiente con capacidad de 20 L por medio de una perforación en una de sus caras laterales. La manguera se fijó por la parte inferior del recipiente y sujetándola la misma hasta la altura requerida por medio de un alambre para establecer el nivel de llenado de agua de los humedales. De este modo, cuando ingrese el líquido al humedal y rebase el nivel de la manguera establecida, el agua comenzaría a desbordar, almacenándose en el recipiente. Esto permitirá que el módulo estuviese saturado de agua permanentemente, actuando a través de un flujo con-

tinuo tipo pistón,⁹ favoreciendo la proliferación del ambiente microbiano dentro del humedal. Para liberar el agua del recipiente de salida, se colocó otra manguera con una válvula para detener o liberar el agua almacenada.

Tanto el recipiente de entrada como el de salida fueron pintados de color negro para reducir el riesgo de proliferación de algas en su interior debido a la exposición del agua con la luz solar. Así mismo, se colocó un polímero termoplástico de color verde a las caras posteriores del módulo 1 y 2, y de la cara frontal del módulo 3 debido a que se construyeron con acrílico transparente (Figura 13).

Cada humedal se alimentó con un agua preparada que simulara las propiedades de un agua gris. Para esto se realizó una mezcla de agua potable tomada directamente de la llave, leche en polvo de la marca Nestle® para proporcionar materia orgánica a la solución, y fertilizante soluble en agua de la marca Miracle-Gro®. Este último suministró nitrógeno total (NT), en una proporción del 15% del peso total, fosfato (P_2O_5), en un 30%, potasio (K_2O), en un 15%, boro (B), en un 0.02%, cobre (Cu), en un 0.07%, hierro (H), en un 0.15%, manganeso (Mn), en un 0.05%, molibdeno (Mo), en un 0.0005% y zinc (Zn), en un 0.06%. La alimentación a cada humedal se llevó a cabo de manera paulatina con base a lo establecido en la Tabla 9.

⁹- El flujo pistón es en el cual el flujo permanece en la unidad y es descargada en la misma secuencia en que se introduce el agua, por lo cual es muy poca la mezcla entre el agua que ingresa y la que sale (Martínez y Márquez, 2014b)





Figura 13. a) Módulos humedal con sistema de alimentación a base de recipientes plásticos, b) Recipiente de almacenamiento de agua preparada con conexiones al tubo de entrada del módulo. c) Conexiones a recipiente de recolección de agua de salida, d) Manguera fijada al interior de recipiente de salida. d) Manguera con válvula en recipiente de salida. Tomada en el jardín del Centro Tecnológico de la FES Aragón

Fuente: Elaboración propia

Para llevar a cabo las proporciones de materiales requeridas, se utilizó una báscula analítica digital. Posteriormente se vaciaron en los recipientes de entrada que se llenaban de agua potable previamente, para verter las soluciones y mezclarlas con una varilla de vidrio.

Cabe destacar que la capacidad de almacenamiento de agua por módulo es de 20 L en promedio una vez ingresado el sustrato, por lo que la cantidad de agua alimentada en el primer periodo de muestreo permitió tener un TRH de un día para producir 20Lts de agua diariamente. En el

Tabla 9. Periodos y proporción de alimentación a humedales

Fuente: Elaboración propia

| | Periodo | Semanas | Alimentación* |
|----------------|--------------------------|---------|---|
| Estabilización | Del 26/09/16 al 18/10/16 | 3 | 20 L de agua potable |
| | Del 19/10/16 al 25/10/16 | 1 | 2g de leche en polvo/ 20Lts de agua potable |
| Muestreo | Del 27/10/16 al 18/11/16 | 3 | 4g de leche en polvo y 4g de fertilizante soluble/ 20 L de agua potable |
| | Del 21/11/16 al 15/12/16 | 3.5 | 2g de leche en polvo y 2g de fertilizante soluble/ 10 L de agua potable |
| | Del 20/01/17 al 03/02/17 | 1 | 2g de leche en polvo y 2g de fertilizante soluble/ 10 L de agua potable |

* La alimentación se llevó a cabo diariamente excepto fines de semana y días festivos

segundo periodo se alimentaron 10Lts por día, logrando un TRH de dos días para este volumen, produciendo así mismo 10Lts de agua diariamente. Esto se llevó a cabo debido a que al aumentar el TRH, permitiría la remoción de nitrógeno de manera más eficiente.

4.2.1.5 Análisis de muestras

Se recolectaron muestras tanto del afluente como del efluente de cada humedal. Ambas muestras se recolectaron en frascos de plástico de 60 mL con tapa roscada. Las pruebas seleccionadas para la primera fase de experimentación fueron Demanda Química de Oxígeno (DQO), Nitrógeno Total (N), Amoníaco (NH₃-), Nitrito (NO₂-) y Nitrato (NO₃-) Sólidos Totales (ST), Sólidos Totales Volátiles (STV) y Sólidos Totales Fijos (STF), pH y Turbidez. Asimismo, se realizaron pruebas para determinar el porcentaje de porosidad y de humedad de cada sustrato, así como los pesos totales de cada módulo en condiciones saturadas de agua, para entonces evaluar las carga estructurales en caso de ser empleados en el VERDEM. Se analizó también el crecimiento de las plantas y temperaturas internas de cada humedal, (Figura 14 y 15).

DQO

Para el análisis de la DQO, se utilizaron reactivos del intervalo 0 a 1500 mg/L para las muestras del afluente y reactivos del intervalo 0 a 150 mg/L

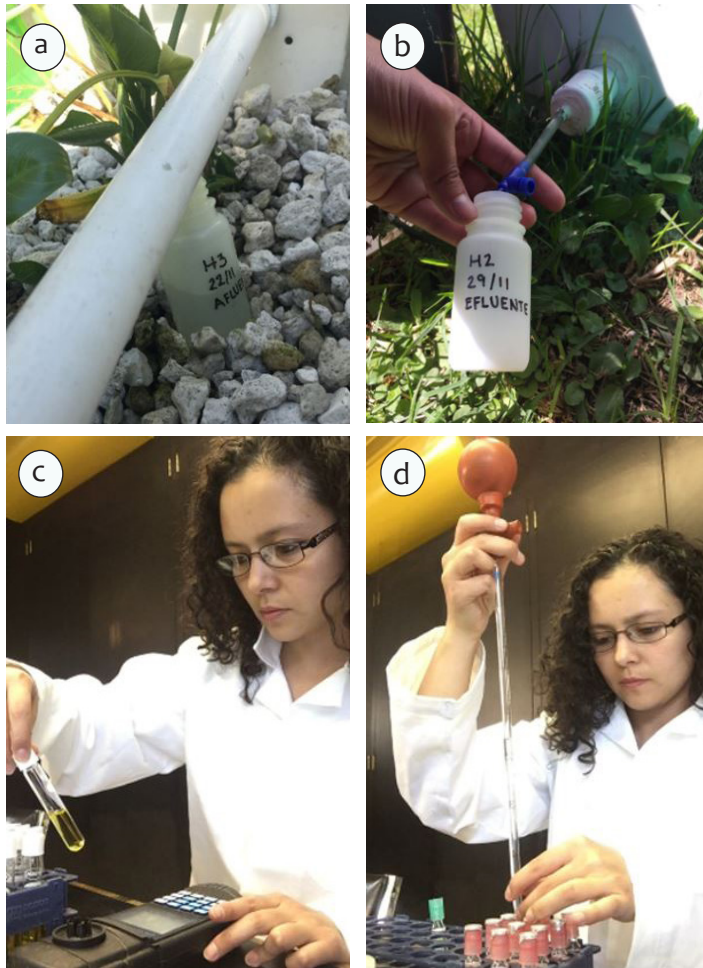


Figura 14. a) Toma de muestras de agua en el afluente y efluente, b) Análisis de muestras para DQO en el colorímetro c) Pipeteo en reactivos para Amoníaco.

Fuente Elaboración propia

para las muestras del efluente de la marca HACH®. El procedimiento de análisis se llevó a cabo de acuerdo a lo descrito en los manuales del mismo proveedor, los cuales cumplen con lo establecido por EPA.

Amoníaco, Nitrito, Nitrato y Nitrógeno Total

En cuanto al análisis de amoníaco, se emplearon reactivos del intervalo 2 a 47 mg/L para muestras del afluente y reactivos del intervalo 0.015 a 2 mg/L para muestras del efluente. Para nitrito y nitrato, los reactivos empleados fueron del intervalo 0.23 a 13.50 mg/L y 0.015 a 0.60 mg/L respectivamente tanto para el afluente como el efluente. Los reactivos usados también fueron de la marca HACH® y la toma de lecturas se llevó a cabo de acuer-

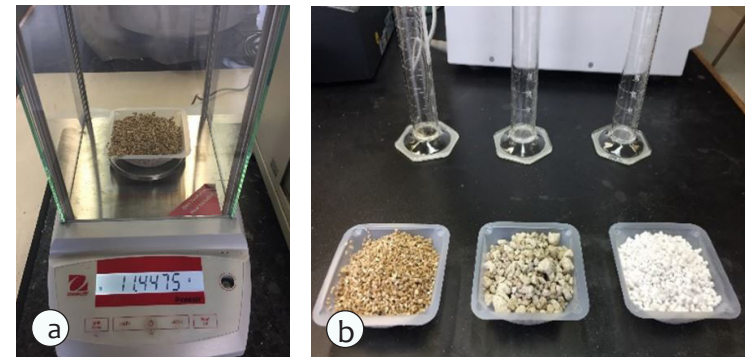


Figura 15. a) Peso de sustratos en báscula analítica b) Sustratos vaciados de probetas

Fuente Elaboración propia

do al método descrito por cada tipo de reactivo, mismos que cumplen con lo establecidos por EPA.¹⁰

Sólidos Totales, Sólidos Totales Volátiles y Sólidos Totales Fijos

El método e instrumentos empleados para determinar la cantidad de ST y STV, se llevó a cabo de acuerdo a lo que establece la norma NMX-AA-034-SCFI-2001, así como los cálculos que ésta establece. En cuanto a los STF, se obtuvo con base a la resta de STV y los ST.

Humedad, Porosidad y Peso Total de Humedales

Para la obtención del porcentaje de porosidad y humedad de los sustratos, se utilizaron tres probetas de 100 mL las cuales se llenaron con los sustrato empleados hasta alcanzar la graduación de 100 mL. Posteriormente se vació la probeta en una bandeja de plástico para ser transportada hacia una báscula analítica y registrar el peso de cada sustrato en condiciones secas. Una vez pesado, se ingresó el sustrato nuevamente dentro de las probetas y se agregó agua hasta alcanzar la graduación de 100 mL. Después se procedió a recolectar en un vaso de precipitado el agua que no fue absorbida por los sustratos. Finalmente se liberó el sustrato húmedo de cada probeta y se vaciaron en las charolas de plástico para ser transportadas a la báscula analítica y registrar su peso en condi-

¹⁰- Siglas en inglés de Environmental Protection Agency. Se hace referencia al apartado de Métodos para el análisis químico de agua y residuos.

ciones húmedas. Una vez obtenidos los datos correspondientes, se calculó el porcentaje de porosidad y de humedad de acuerdo a las ecuaciones establecidas en el Anexo 4.

Ph y Turbidez

Para obtener los niveles de pH y turbidez, se utilizó un potenciómetro de la marca Oakton® y un turbidímetro marca LaMotte respectivamente, mismos que fueron empleados de acuerdo a los procedimientos establecidos por el fabricante y la normatividad aplicable.

Crecimiento de plantas y temperaturas internas

Adicionalmente a las pruebas de laboratorio realizadas, se monitoreó la velocidad de crecimiento de las plantas de acuerdo al tipo de sustrato empleado por medio de un reporte fotográfico semanal. Se tomaron además lecturas diarias de las temperaturas internas de cada humedal a 30 cm por debajo de la superficie en la esquina superior izquierda de cada módulo utilizando un termómetro de mercurio. Esto fue llevado a cabo durante el periodo de Noviembre 2016 a Enero 2017 entre las 10:00 y las 16:00hrs, para evaluar las ganancias térmicas del humedal debido a la radiación solar y determinar si eran óptimas para los procesos biológicos dentro de éste.





4.2.1.6 Resultados y discusiones Fase 1

DQO

Los tres sustratos presentaron muy buenas eficiencias de remoción de DQO, con un promedio del 97.80%, 92.24% y 88.30% para la vermiculita (H1), perlita (H2), y tepojal (H3), respectivamente, (Ver anexo 1). La Figura 16 muestra la concentración de DQO en el afluente y efluente de acuerdo al número de muestra analizada. Cabe aclarar que en las primeras tres muestras no se analizó el efluente debido a que los humedales se encontraban en un periodo de estabilización.

Amoníaco, Nitrito, Nitrato y Nitrógeno Total

En las aguas residuales, el nitrógeno se encuentra en dos formas básicas; nitrógeno orgánico, nitrógeno amoniacal, nitrito y nitrato. La descomposición por las bacterias transforma fácilmente el nitrógeno orgánico en amoniacal y por medio del proceso de nitrificación, este es transformado en nitrito y rápidamente en nitratos, que es la forma más oxidada que se encuentra el nitrógeno en el agua, que es la forma más oxidada que se encuentra el nitrógeno en el agua, (Ambientum, 2002). En este sentido, la eficiencia en la remoción de Amoníaco en cada uno de los humedales fue del 81.3%, 82.55% y 85.46% para H1, H2 y H3 respectivamente. La remoción de Nitrito fue de un 83.80% para H1, 73.62% para H2 y 71.98% en H3. En cuanto al Nitrato, se observaron concentraciones

mayores en el efluente en relación con las concentraciones iniciales de las muestras H1 y H3 con un -27.05% y -10.88% respectivamente. H2 por su parte generó una remoción del 14.91%. El predominio de la forma de nitrato en un agua residual indica que el residuo no está demandando una mayor cantidad de oxígeno, por lo que éste se ha estabilizado. Por otro lado se puede deducir que el nitrato producido en el humedal, supera la cantidad que las plantas pueden consumir, por lo que el exceso de nitrato es consumido por los microorganismos mismos que mueren, produciendo a su vez más nitrato.

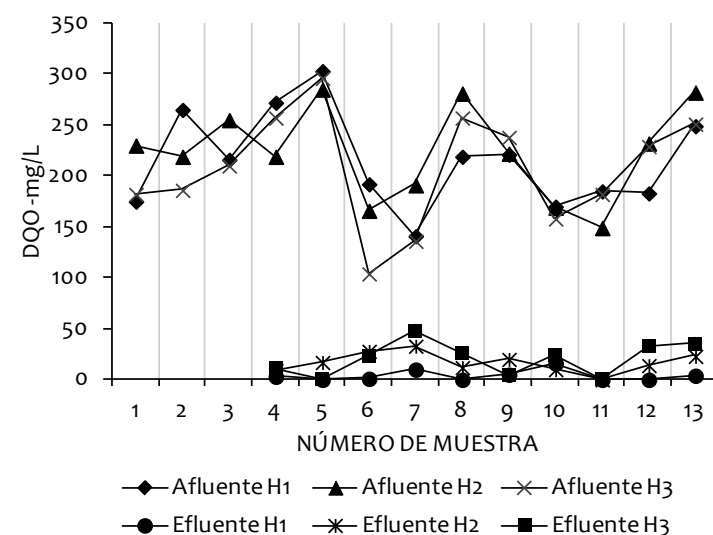


Figura 16. Concentración de Demanda Química de Oxígeno, (DQO) en afluente y efluente de cada humedal.

Fuente: Elaboración propia

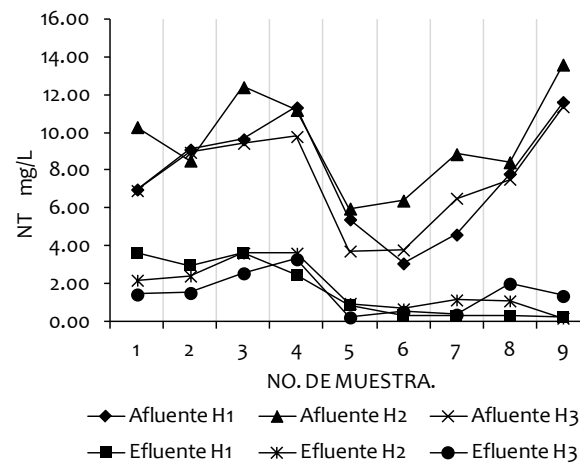
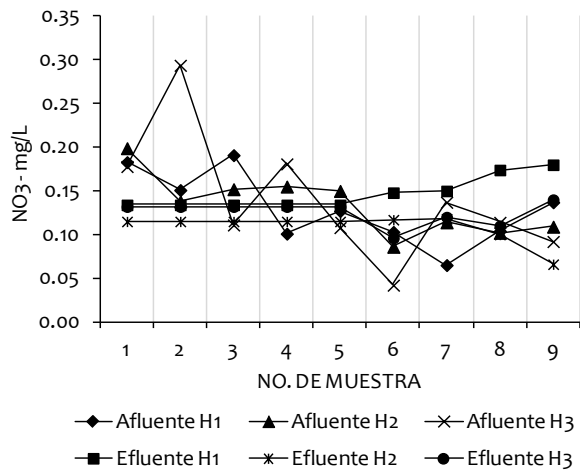
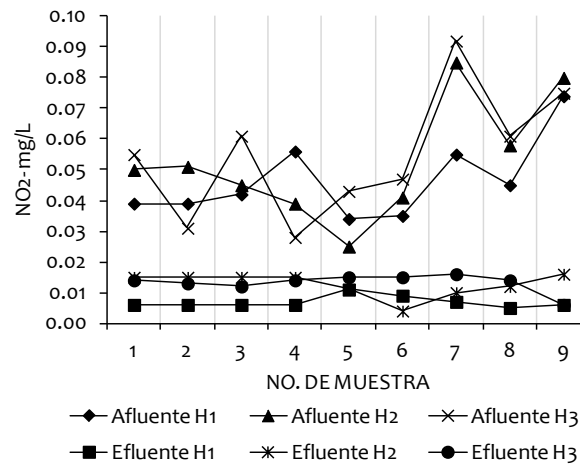
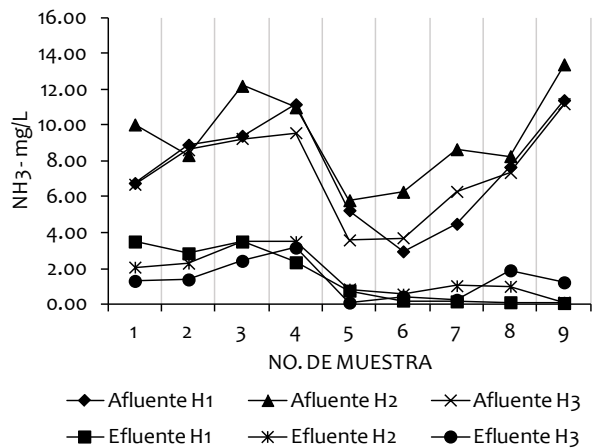



Figura 17. Concentración de contaminantes en el afluente y el efluente de cada humedal para Amoníaco (NH₃), Nitrito (NO₂-), Nitrato (NO₃-), Nitrógeno Total (NT)
Fuente: Elaboración propia



De acuerdo a los datos obtenidos, se suma entonces Amoníaco, Nitrito y Nitrato en el afluente y efluente para componer el Nitrógeno Total, mismo que presentó una remoción promedio de 77.11%, 79.45% y 81.03% para H1, H2 Y H3 respectivamente. La Figura 17, muestra la concentración de dichos contaminantes anteriormente mencionados para el afluente y el efluente de cada uno de los humedales, (Ver anexo 1).

Sólidos Totales, Sólidos Totales Volátiles y Sólidos Totales Fijos

El residuo restante después de que una muestra de agua ha sido evaporada y secada a una temperatura de 103 a 105°C representa los Sólidos Totales (Metcalf & Eddy, 2003, p. 43). De éste no se observó remoción en ninguno de los humedales, siendo -0.14%, 1.06% y -3.86% en H1, H2 y H3 respectivamente. Por otro lado, los STV que son los sólidos que pueden ser volatilizados y quemados cuando los ST son incendiados a $500 \pm 50^\circ\text{C}$ (*ibid.*), se presentó una mayor remoción de estos en H2 con un 3.80% seguido de H3 con 1.96% y -4.39% en H1.

Los STF por su parte, son los residuos que permanecen después de que los ST son incendiados (*ibid.*). De este último se observó una remoción del 1.47%, -1.56% y -5.94% en H1, H2 y H3 respectivamente. Los ST tanto en el afluente como en el efluente, se compusieron en una proporción del 23.20% de STV y 76.38% de STF en promedio (Figura 18), (Ver anexo 2).

pH

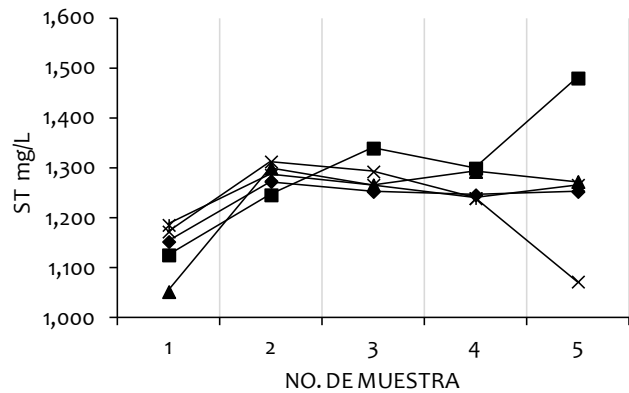
Los valores obtenidos de pH fueron muy similares en todos los casos, los cuales fueron de 6.78, 6.72 y 6.81 en promedio para H1, H2 y H3. En el efluente se mejoraron las condiciones de neutralidad, obteniendo así un pH promedio de 7.14, 7.19 y 7.30 para H1, H2 y H3 respectivamente (Ver anexo 3). La obtención de un pH neutro en el efluente reveló que los humedales aportaron iones hidróxido (OH⁻) y sales al agua. También se puede mencionar que el pH identificado en ambos flujos, a su vez favoreció la existencia de la vida biológica dentro de los humedales, misma que es posible si se encuentra entre 6 y 9 (*ibid.*, p. 57), lo cual ayudó a la actividad metabólica para la degradación de la materia orgánica.

Turbidez

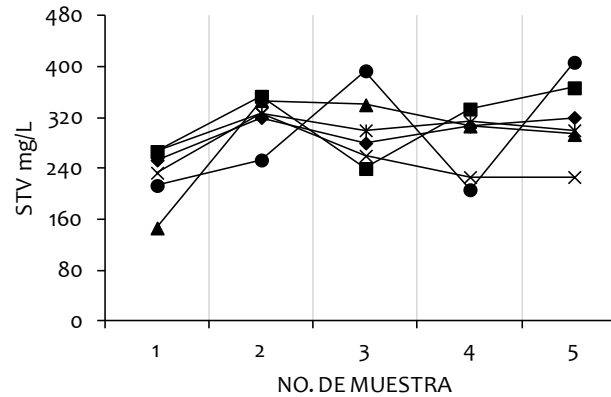
La turbidez, indica la cantidad de materia coloidal y en suspensión en el agua (*ibid.*, p. 51). Esta se redujo significativamente en el H1 siendo de 95.2%, de eficiencia, obteniendo valores por debajo de las 2 UTN, seguida de 81.20% en H2 y de 84.4% en H3, (Figura. 19), (Ver anexo 3).

Humedad, Porosidad y Peso Total de Humedales

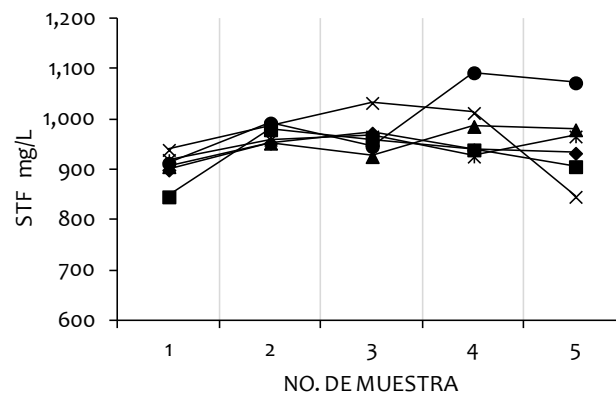
En cuanto a los porcentajes de humedad obtenidos, la vermiculita presentó una capacidad de retención de la humedad del 72%, seguido de la perlita con un 63%, siendo el de menor capacidad el tepojal con el 30%. En cuanto a la porosidad, la vermiculita también presentó un mayor por-



◆ Afluyente H1 ■ Efluente H1 ▲ Afluyente H2
 ✕ Efluente H2 * Afluyente H3 ● Efluente H3



◆ Afluyente H1 ■ Efluente H1 ▲ Afluyente H2
 ✕ Efluente H2 * Afluyente H3 ● Efluente H3



◆ Afluyente H1 ■ Efluente H1 ▲ Afluyente H2
 ✕ Efluente H2 * Afluyente H3 ● Efluente H3

Figura 18. Concentración de Sólidos Totales (ST), Sólidos Totales Fijos (STF), Sólidos Totales Volátiles (STV), en afluente y efluente de cada humedal
Fuente: Elaboración propia

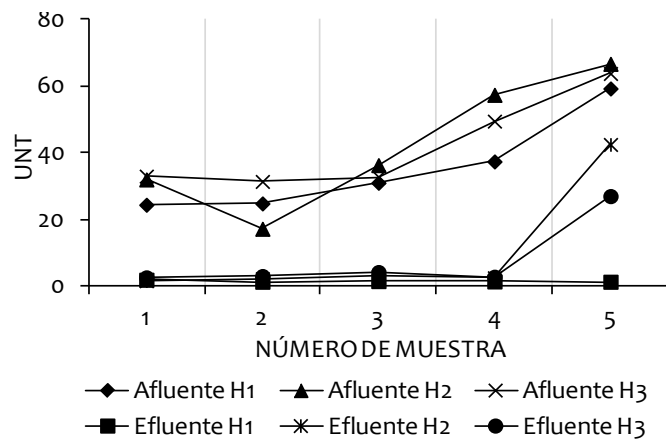


Figura 19. Unidades de Turbidez Nefelométricas en el afluente y efluente de cada humedal

Fuente: Elaboración propia

centaje con un 83.50%, en comparación con la perlita y el tepojal que fueron muy similares, siendo del 59.25% y 61.00% respectivamente. Con base en lo anterior y considerando las capas de sustrato empleadas en cada humedal, se pudo determinar el peso total de los módulos en condiciones saturadas de agua. De acuerdo a los cálculos obtenidos, el H2 generó un peso de 35.14kg, siendo éste el más ligero de todos, seguido de H1 con un peso de 37.11 kg y finalmente H3 con 42.571 kg, (Ver anexo 4).

Crecimiento de Plantas

El crecimiento de plantas en cada humedal fue evidente durante toda la fase de experimentación. En este sentido, se observó que la capacidad

de adaptabilidad de *Zantadeschia aethiopica* en el tepojal fue lento ya que mostró bajo crecimiento al inicio en comparación con los otros humedales, siendo mayor en las últimas semanas de experimentación. Por otro lado, se pudo apreciar que dentro del sustrato perlita se tuvo mejor crecimiento, aumentando al doble su altura inicial en un plazo de 16 semanas. En cambio dentro del sustrato vermiculita, esta misma presentó muy buena capacidad de adaptabilidad desde el inicio. También se observó un crecimiento aproximado del triple de su altura inicial, (Figura 20). El Anexo 5 muestra un reporte fotográfico detallado de crecimiento semanal de cada uno de los humedales.

Temperaturas Internas en Humedales

Las temperaturas internas obtenidas mostraron una diferencia promedio de -2.76°C con respecto a la temperatura ambiente en los tres humedales. Durante las 10:00 y las 12:00 h se presentaron temperaturas internas promedio de 15.58°C . Entre las 12:00 y las 13:00 h fueron de 18.67°C y entre las 13:00 y 16:00 h se observó de 19.85°C . Esto quiere decir que la mayor parte de la actividad bacteriana sucede por la tarde cuando se alcanza mayores temperaturas, ya que a mayor temperatura, mejor desempeño, sobre todo si se encuentra entre el intervalo de 25 y 35°C que es el intervalo óptimo (*ibid.*, p. 55), (Ver anexo 6).



Figura 20. Crecimiento progresivo de *Zantedeschia aethiopica* en cada uno de los humedales. En cada imagen se observa de izquierda a derecha el H1, H2 y H3. a) Crecimiento presentado en la semana 5, b) Crecimiento presentado en la semana 10, c) Crecimiento presentado en la semana 16
Fuente: Elaboración propia

Resumen

Con base en los datos obtenidos, se observa que el humedal que mejor desempeño demostró fue el H1, correspondiente al sustrato de vermiculita ya que dentro de los contaminantes presentes en el afluente, fue el que mejores remociones presentó en la mayoría de los casos. En cuanto al pH, aunque todos presentaron niveles de neutralidad, el H1 se acerca aún más a este nivel, por lo que también se selecciona como el mejor. Por otro lado H1 también mostró mayor porosidad y retención de humedad, favoreciendo así la capacidad de aireación dentro del humedal. En cuanto al peso de cada humedal en condiciones saturadas de agua, H2 muestra una mayor ligereza que los demás, sin embargo H1 presenta sólo una diferen-

cia de 2 kg con respecto a este. Cabe destacar que a pesar de la ligereza del sustrato perlita, está tendía a flotar, lo cual provocaba que llegara a la superficie proliferando el crecimiento de algas.

El crecimiento de plantas fue uno de los factores decisivos para elegir el sustrato adecuado, ya que a mayor crecimiento, mayor desarrollo de raíz en el interior del humedal, favoreciendo así la oxigenación (Figura 21). Además, permitiría que las plantas que se emplearan dentro del VERDEM, desarrollarán una mayor frondosidad y por ende será más atractivo estéticamente. En este sentido el sustrato elegido para ser utilizado en la Fase 2 de experimentación fue la vermiculita, (Tabla 10).

Tabla 10. Resumen del desempeño total por humedal de acuerdo al análisis de contaminantes seleccionados

Fuente: Elaboración propia

| No. de humedal | Eficiencias de remoción | | | | | | | pH | Humedad | Porosidad | Peso saturado (kg) | Mejor crecimiento de plantas |
|----------------|-------------------------|----------|---------|---------|--------|--------|----------|------|---------|-----------|--------------------|------------------------------|
| | DQO | Amoníaco | Nitrito | Nitrato | NT | ST | Turbidez | | | | | |
| H1 | 97.80% | 81.30% | 83.80% | -27.05% | 79.42% | -0.14% | 95.24% | 7.16 | 72.00% | 83.50% | 37.11 | 1 |
| | X | | X | X | | | X | X | X | X | | X |
| H2 | 92.24% | 82.55% | 73.62% | 14.91% | 81.54% | 1.06% | 81.23% | 7.22 | 63.41% | 59.25% | 35.14 | 2 |
| | | | | | | X | | | | | X | |
| H3 | 88.30% | 83.46% | 71.98% | -10.88% | 81.80% | -3.86% | 84.36% | 7.33 | 30.26% | 61.00% | 42.57 | 3 |
| | | X | | | X | | | | | | | |



Figura 21. Cara posterior de H1 y H2 de izquierda a derecha, que muestra el crecimiento de algas en la capa superior del H2. También se observa un mayor desarrollo de raíz en el primero. Se muestra además la presencia de humus dentro de los humedales, así como en H3 (extremo derecho) en el proceso de desmontaje del sistema.

Fuente: Elaboración propia

Al final de la fase experimental se observó a través de la cara transparente de los humedales, una coloración del agua oscura siendo más intensa en H2. Esto mismo se observó en H3 al momento de desmontar el sistema, ya que se presentó una pigmentación entre morada y rojiza tanto en las paredes del módulo como en el propio sustrato. Esto sirvió como indicador de la presencia de humus en los humedales, es decir, materia orgánica en descomposición, lo cual demuestra que la actividad microbiana en estos es favorable. Esto a su vez explica la obtención de sólidos en el efluente, pues fueron producto de la materia en descomposición.

4.2.2 Fase 2- Montaje del VERDEM

4.2.2.1 Fijación y preparación de módulos

Se empleó el H1 de la primera etapa, el cual no fue desmontado, mismo que se ubicó en la quinta posición del VERDEM, para aprovechar la estabilidad que el sistema ya había logrado, (Figura 22).

Cada uno de los módulos restantes, se prepararon de acuerdo a las capas empleadas de H1. Del mismo modo que en la primera etapa, se tamizaron previamente los sustratos y se lavaron las raíces de las plantas utilizadas.



Figura 22. Fijación de módulos en muro
Fuente: Elaboración propia

Para la segunda Fase, H1 se identificó como el primer módulo de arriba hacia abajo en el cual se plantaron tres *Zantedeschia aethiopica*. En H2, se plantaron dos ejemplares de *Neprolepis exaltata*. En H3 se distribuyeron dos *Tradescantia zebrina* y en H4, dos ejemplares de *Chlorophytum*



Figura 23. Diseño hidráulico del VERDEM
Fuente: Elaboración propia

comosum, siendo H5 el módulo de la Fase 1. La cantidad de plantas elegidas para sembrar en cada módulo, fue con base en la frondosidad de éstas y su capacidad de cubrir el ancho del módulo, (Figura 23). El sistema fue fijado en un muro con orientación este, en el cual se presentaba un asoleamiento directo hasta las 12:00 h, y generando una mayor cantidad de sombra a las 13:00 h, (Ver anexo 7)

4.2.2.2 Diseño hidráulico del sistema

Se empleó un contenedor de plástico de 100 L de capacidad en donde se colocó una bomba de agua sumergible para 2.5 m de altura, marca Aquasub. El agua se bombeaba directamente hacia el H1 y al H3 a partir de tubería de PVC, unida con tuercas unión a los extremos de los tubos de cada módulo. En los tubos de salida de cada módulo, también se utilizaron tuercas unión para conectar la tubería de PVC entre un módulo y otro. En los demás extremos, se colocó un tapón capa.

Para obtener los humedales saturados de agua permanentemente, se fijó el nivel de llenado deseado con la tubería de PVC generando una vuelta, como se muestra en la Figura 22. De esta manera, una vez que el agua que ingresaba al H1, alcanzaba la altura marcada, se comenzaba a rebosar e iniciaba su recorrido hacia el H2. Cuando este último lograba su nivel de llenado, el agua se direccionaba hacia el H5, el cual finalmente se conectaba con el recipiente de salida de 100 L de capacidad. El mismo procedimiento se logró con el H3, el cual se conectaba con el H4 y este con el H5. Gracias al diseño hidráulico obtenido, el agua lograba atravesar tres módulos, lo cual podría garantizar una mayor cantidad de remoción de contaminantes, que si sólo atravesara uno solo. Además, al direccionar el agua ingresada a dos módulos, la carga de contaminantes no se concentraría en uno sólo, lo que podría causar un daño a las plantas.

Al igual que en la primera fase de experimentación, el sistema se alimentó con agua preparada, aumentando gradualmente la proporción. Posteriormente se alimentó el sistema con agua gris, La Tabla 11 muestra los periodos de alimentación y las proporciones empleadas.

Se estimó que el VERDEM tiene la capacidad de almacenar 100 L, esto considerando que cada módulo retiene 20 L en promedio. Dicho lo an-

terior, el TRH fue de dos días cuando se alimentaba el sistema con 50 L diarios. Posteriormente el TRH se redujo a un día, ya que se alimentaba diariamente 100 L, mismo que era retenido un día completo y liberado al día siguiente una vez que ingresaban otros 100 L al sistema. Cabe mencionar que el tiempo que tardaba el sistema en producir este volumen era entre 8 y 8:30 h.

Tabla 11- Periodos y proporción de alimentación al sistema

Fuente: Elaboración propia

| | Período | Semanas | Alimentación / proporción* |
|---------------------------|-----------------------------|---------|--|
| Período de estabilización | Del 27/02/17 al 10/03/17 | 2 | 50lts de agua potable |
| | Del 13/03/17 al 07/04/17 | 6 | 10g de leche en polvo y 10g de fertilizante soluble/ 50lts de agua potable |
| Período de muestreo | A. Del 17/04/17 al 28/04/17 | 4 | 20g de leche en polvo y 20g de fertilizante soluble/ 100lts de agua potable |
| | B. Del 1/05/17 al 5/05/17 | 2 | 30g de leche en polvo y 30g de fertilizante soluble/ 100lts de agua potable |
| | C. Del 8/05/17 al 12/05/17 | 1 | 100 lts de agua gris/ 40% de lavado de trastes de taquería, 40% de lavadora, 20% de lavado de trastes domésticos |
| | D. | | |
| | 5/18/2017 | - | 100 lts de agua gris/ 20% de lavado de trastes domésticos, 80% de lavadora |
| | 5/19/2017 | - | 100 lts de agua gris/ 20% de lavado de trastes domésticos, 80% de lavadora |
| | 5/22/2017 | - | 100 lts de agua gris/ 20% de lavado de trastes domésticos, 80% de lavadora |

* La alimentación se llevó a cabo diariamente excepto fines de semana y días festivos

4.2.2.3 Análisis de muestras

Se recolectaron muestras tanto del afluente como del efluente del VERDEM, siendo el efluente, el agua del recipiente de entrada y la del efluente la que salía del H5 para almacenarse en el recipiente de salida. Las pruebas seleccionadas para la segunda fase de experimentación fueron DQO, Nitrógeno Total (N), compuesto por Amoníaco (NH_3^-), Nitrito (NO_2^-) y Nitrato (NO_3^-), Sólidos Suspendedos Totales (SST), Sólidos Suspendedos Volátiles (SSV) y Sólidos Suspendedos Fijos (STF), pH y Turbidez. Se analizó también el crecimiento de las plantas y temperaturas internas de cada humedal. Se agregó además la prueba de Fosforo (P) y se recolectaron datos de temperatura de la parte frontal y de la parte posterior del VERDEM, así como de la cara interior del muro para analizar las diferencias de temperatura. Por último se agregó la prueba de Grasas y Aceites, este último únicamente para las muestras recolectadas de agua gris. Todas las pruebas fueron realizadas con base en la misma normatividad y mismo procedimiento establecido en la Fase 1. A continuación se describe el análisis de las muestras que no se incluyeron en la Fase 1.

Sólidos Suspendedos Totales, Sólidos Suspendedos Volátiles, y Sólidos Suspendedos Fijos

El método e instrumentos empleados para determinar la cantidad de SST y SSV, se llevó a cabo acuerdo a lo que establece la norma NMX-AA-034-

SCFI-2001, así como los cálculos que ésta establece. En cuanto a los SSF, se obtuvo con base a la resta de SSV menos los SST.

Fósforo

Se emplearon almohadillas de reactivo en polvo para fosfatos de la marca HACH® procedimiento se llevó a cabo de acuerdo al método a lo descrito en los manuales del mismo proveedor, los cuales cumplen con lo establecido por EPA.

Grasas y Aceites

El método e instrumentos empleados para esta prueba, se llevó a cabo acuerdo a lo que establece la norma NMX-AA-005-SCFI-2000. Para reducir el contenido de grasas y espuma que contenía el agua gris ingresada, se optó por filtrarla previamente en aserrín. Sin embargo, esto no resultó conveniente ya que el tiempo que tardaba en filtrar 1.5 L por gravedad, se extendía a una hora. Por tal motivo, se decidió dejar que se sedimentaran las partículas gruesas y que flotara la espuma dentro de los garrafones que contenían el agua gris, para que posteriormente se extrajera lentamente por medio de un sifón y vertiera en el contenedor de agua de entrada, (Figura 25).

Diferencia de Temperaturas

Se recolectaron datos de temperatura cada hora entre las 10:00hrs y

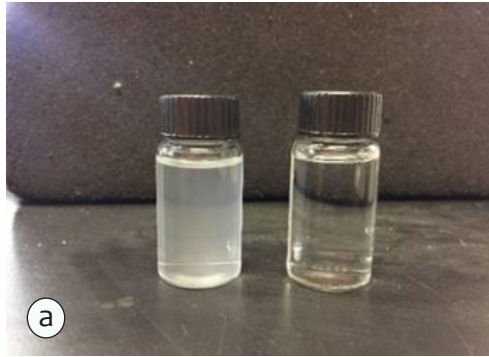


Figura 24. a) Muestra de agua del afluente y del efluente para análisis de turbidez, b) Proceso de filtrado por succión con matraz, Crisoles Gooch y microfibras filtrantes para retener los SST, c) Proceso de filtrado por succión con matraz, Embudo Buchner, papel filtro de poro fino para retener grasas y aceites, d) Equipo Soxhlet y cartucho de extracción de celulosa con papel filtro, e) Empleo de termómetro de mercurio para toma de temperaturas enfrente de módulos, f) Empleo de termómetro digital para toma de temperaturas en la parte posterior de módulos.

Fuente: Elaboración propia



Figura 25. Izquierda, filtro de aserrín para grasas y aceites, derecha, garrafones conteniendo agua gris
Fuente: Elaboración propia

las 13:00hrs durante 26 días siendo estos días hábiles. Las temperaturas fueron tomadas en la parte frontal de cada módulo empleando un termómetro de mercurio y en la parte posterior utilizando un termómetro digital. También se tomaron las temperaturas superficiales de la cara interior del muro en el área en donde se ubicaban los módulos y en donde no, utilizando un termómetro infrarrojo marca Fluke, (Figura 26). Cabe aclarar que en el interior, no se observaba la posición del H5 debido a que el nivel de piso era mayor que la del exterior, por lo que no se tienen datos de éste. Adicionalmente se utilizó una cámara termográfica marca Fluke Ti400, para observar las diferencias de temperaturas en la superficie del muro entre una hora y otra desde la cara interior del muro.



Figura 26. Ubicación de los módulos en la cara interior del muro. Puntos rojos y azules indican posición del termómetro infrarrojo para la toma de temperaturas en la ubicación de módulos y en el área en donde no se fijaron.
Fuente: Elaboración propia

4.2.2.4 Resultados y Discusiones Fase 2

DQO

El sistema presentó un eficiencia de remoción del 90.67% en promedio, (Ver anexo 8). Cabe destacar que la concentración de DQO presentada en las últimas tres muestras del afluente, no refleja las concentraciones de una agua gris doméstica, sino más bien a la de una agua residual doméstica de alta concentración por tener más de 1000 mg/L (CONAGUA, 2007). Esto pudo haberse presentado debido a la concentración de grasas y aceites proveniente de la taquería, que conformó el 40% de la primera alimentación de agua gris, además de que otro 40% la conformó el agua de descarga de la lavadora, lo cual sobrepasa la proporción encontrada en un agua gris doméstica. En cuanto a las dos alimentaciones posteriores, sucedió algo muy similar, ya que hubo un exceso de agua proveniente de la lavadora. A pesar de esto, la remoción fue bastante buena en las últimas tres muestras mencionadas. Dado lo anterior, se puede decir que la concentración de DQO lograda en las demás alimentaciones del afluente a partir de la mezcla de fertilizante y leche en polvo, sí podría corresponder a la de un agua gris doméstica, pues si se considera que la DQO de un agua residual doméstica de baja concentración oscila entre los 250 mg/L, (CONAGUA, 2007), las obtenidas fueron de un promedio de 150 mg/L. La Figura 27 muestra las concentraciones del afluente y el efluente de cada una de las muestras obtenidas en los diferentes periodos de alimenta-

ción. En ésta se observa que a pesar de que se aumentó la cantidad de agua ingresada y se redujo el TRH a un día, el sistema se mantuvo estable pues los resultados obtenidos en el efluente fueron consistentes.

Amoníaco, Nitrito, Nitrato y Nitrógeno Total

La eficiencia de remoción de amoníaco correspondió a un 81.99% en promedio. En cuanto al nitrito y nitrato fue de 0.83% y 8.33% en promedio. Esto se debió muy probablemente a que el TRH establecido fue muy poco

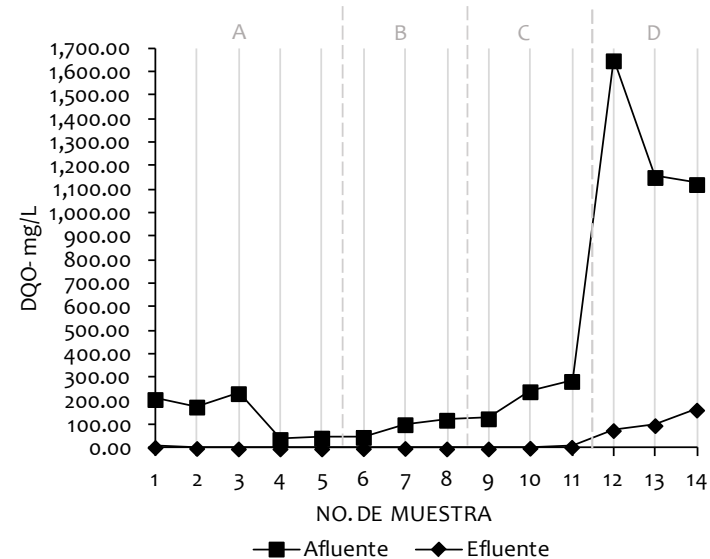


Figura 27. Concentración de Demanda Química de Oxígeno (DQO), en el afluente y efluente del VERDEM por cada periodo

Fuente: Elaboración propia



como para permitir un proceso de nitrificación adecuado. Esto se puede observar en la tabla 2 y 3 para nitrito y nitrato, ya que cuando inicia el periodo de alimentación a 100 L, la eficiencia disminuye volviéndose un poco inestable, aunque trata de estabilizarse al final. A pesar de lo anterior, se puede decir que el nitrato generado fue aprovechado por las plantas en mayor medida que en la fase 1 de experimentación debido a que se sembraron una mayor cantidad de especies. Dado lo anterior, se tiene un promedio de eficiencia de remoción de Nitrógeno Total del 78.25%, (Ver anexo 8), (Figura 28).

Sólidos Suspendedos Totales, Sólidos Suspendedos Volátiles y Sólidos Suspendedos Fijos

Los SST es una porción de lo ST que son retenidos en un filtro con un tamaño de poro que es normalmente de $1.58\mu\text{m}$, y que son pesados después de ser secados a una temperatura de 105°C . (Metcalf & Eddy, 2003, p. 43). Por lo tanto, la eficiencia de remoción fue de un 87.12%. Por otro lado, los SSV, son los que pueden ser volatilizados y quemados cuando los SST son calcinados a $500 \pm 50^{\circ}\text{C}$ (*ibid.*). En cuanto a estos, se obtuvo una eficiencia de remoción de 82.28% en promedio. Finalmente los SSF son los residuos que se permanecen después de que los SST son calcinados, (*ibid.*). De éstos últimos, la eficiencia fué de un 80% en promedio. De acuerdo a esto, se observa que el sistema es capaz de filtrar, sedimentar y degradar eficientemente los SST, a pesar de que se observaron mayores

concentraciones en el último periodo, (Ver anexo 9), (Figura 29).

pH y Turbidez

Tanto en el efluente como en el afluente, se presentaron condiciones muy cercanas al nivel neutro, siendo de 6.83 en el afluente y de 7.30 en el efluente, por lo que se observa una aportación de OH^- al igual que en la Fase 1, que del mismo modo, favoreció la existencia de vida biológica dentro del VERDEM. En cuanto a la turbidez, se presentó una eficiencia de 91.5%, aunque se volvió inestable en el ultimo periodo. (Ver anexo 10), (Figura 30).

Fósforo

El fósforo presente en el afluente como en el efluente, sobrepasaron las concentraciones de detección del método analítico en todas las muestras, siendo éste de 2.75 mg/L por lo que no se pudo determinar la remoción de dicho contaminante.

Crecimiento de Plantas

En cuanto al crecimiento de plantas se observó que el H_2 , correspondiente a la especie *Neprolepis exaltata*, posiblemente no soportó las condiciones de saturación del humedal o la exposición solar, ya que sus hojas se fueron secando gradualmente. Por este motivo, se optó por sustituirla en la semana 6 por dos ejemplares de *Chlorophytum comosum*. En cuanto

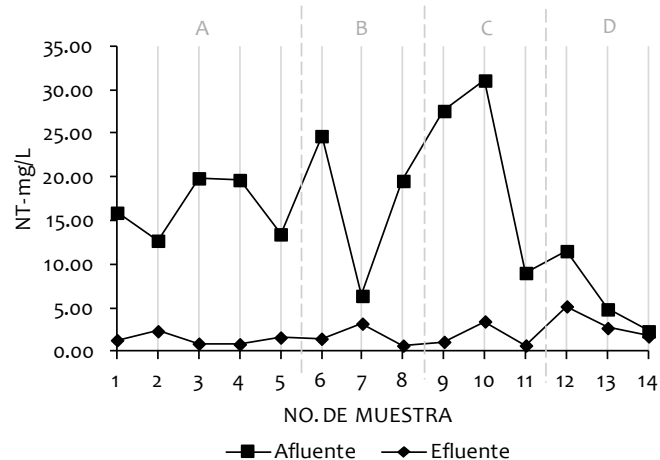
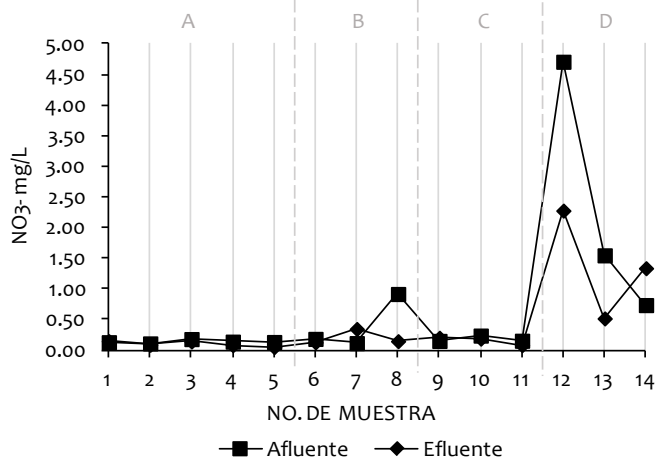
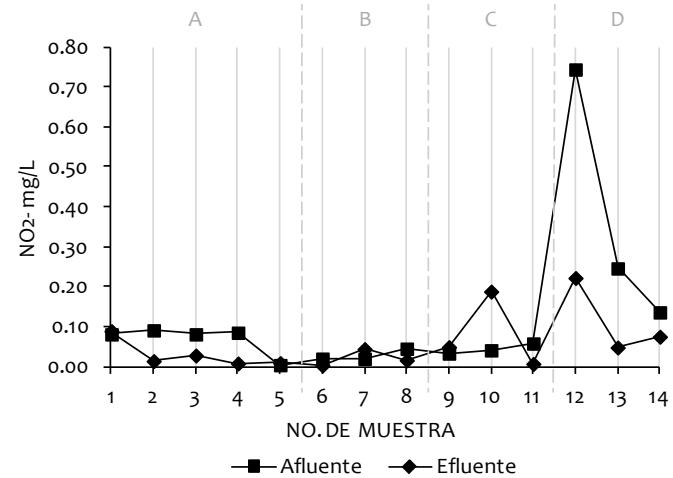
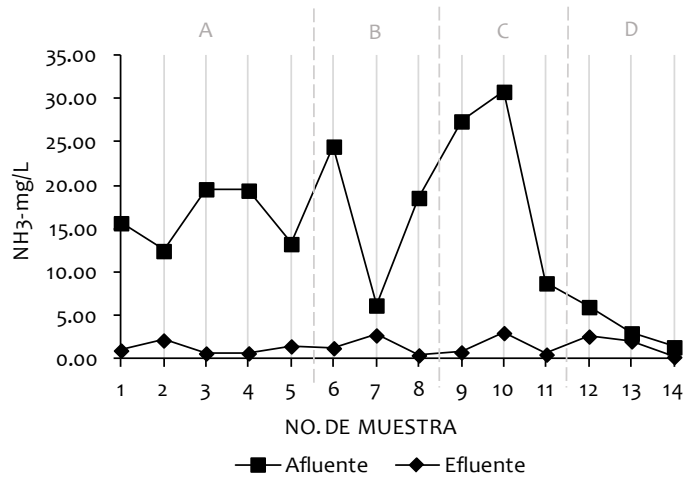


Figura 28. Concentración de Amoníaco (NH₃), Nitrito (NO₂-), Nitrato (NO₃-), Nitrógeno Total (NT) en el afluente y el efluente del VERDEM por cada periodo.

Fuente: Elaboración propia

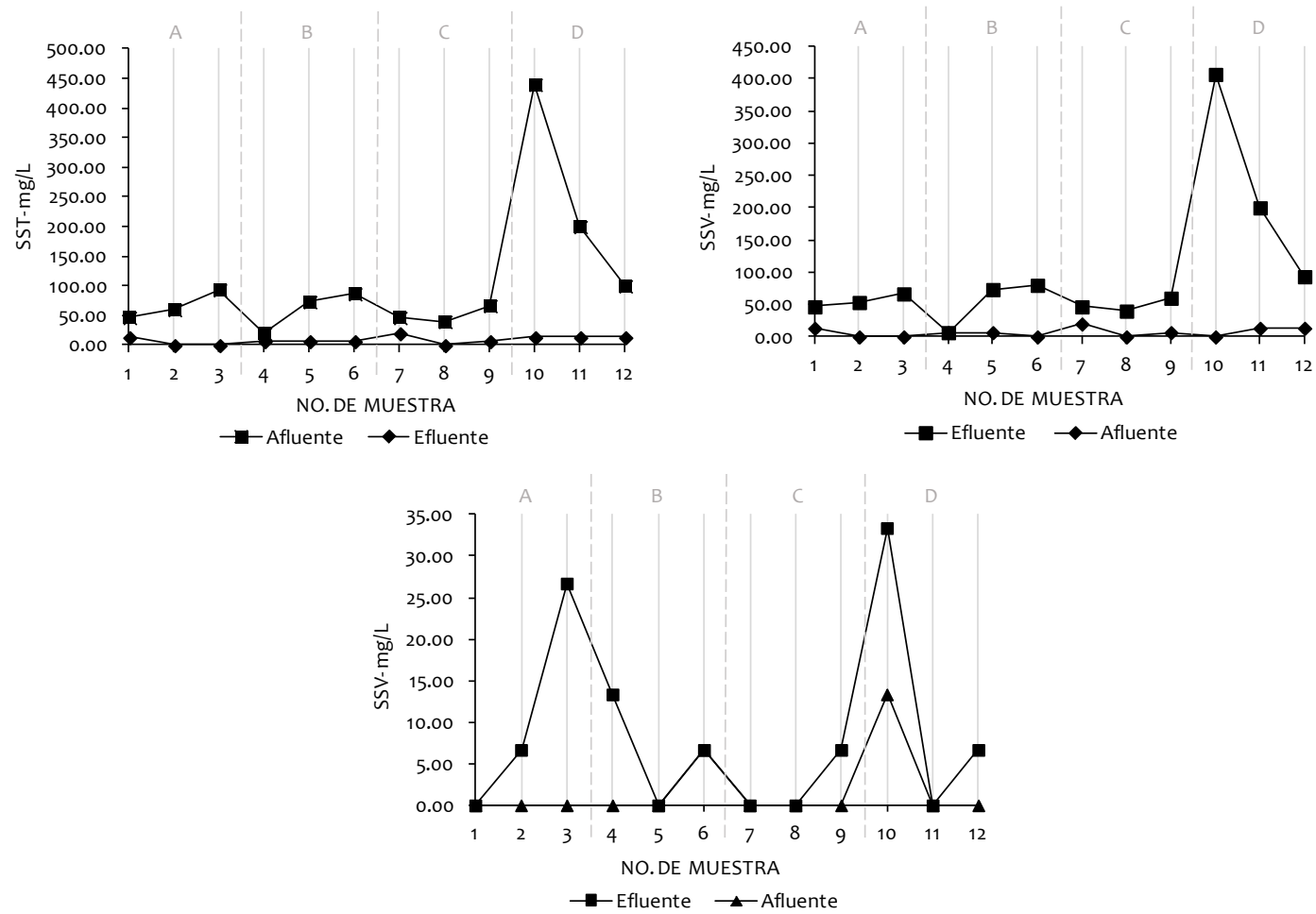


Figura 29. Concentración de Sólidos Suspendedos Totales (ST), Sólidos Suspendedos Fijos (STF), Sólidos Suspendedos Volátiles (STF), en afluente y efluente del VERDEM por cada periodo.

Fuente: Elaboración propia

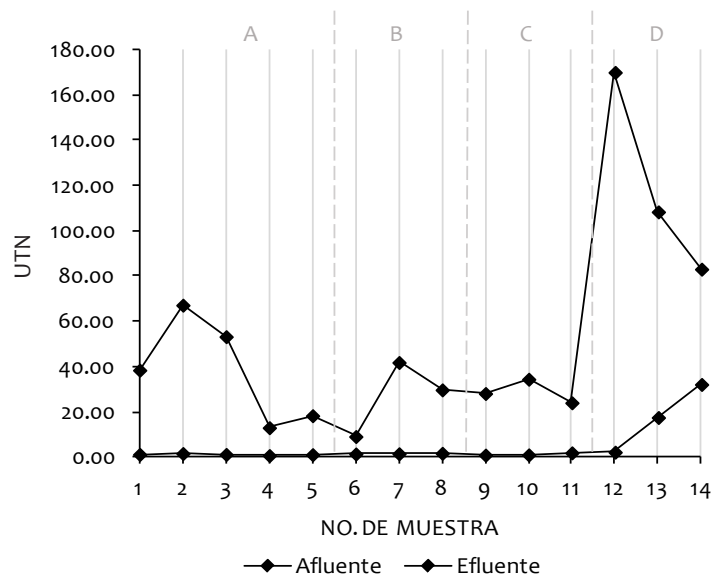


Figura 30. Unidades de Turbidez Nefelométricas en el afluente y efluente del VERDEM

Fuente: Elaboración propia

a las demás especies, se presentó un crecimiento mayor en H1, H3 y H5 correspondiente a *Zantedeschia aethiopica*, *Tradescantia zebrina* y *Zantedeschia aethiopica* respectivamente. H1 y H3 se les puede atribuir a que eran los primeros en recibir los contaminantes y H5, debido a la estabilidad que éste ya presentaba desde la Fase 1, (Figura 31). El Anexo 11 muestra un reporte fotográfico detallado de crecimiento semanal del VERDEM.

Temperaturas Internas

Se tomaron las temperaturas internas de cada módulo a las 12:00 h. Con base en los datos obtenidos, se presentó una temperatura interna promedio de 20.25°C, con una máxima de 28°C la cual se presentó en el H1 y una temperatura mínima de 17°C presentada en H4. Esto demuestra que se obtuvo buena actividad bacteriana en el sistema, (Ver anexo 12)

Diferencia de Temperaturas

Para tener una mayor referencia de las temperaturas obtenidas, en la Figura 33 se presenta una gráfica de las temperaturas promedio obtenidas en cada uno de los puntos registrados. Se puede observar que las mayores temperaturas se presentaron en la parte frontal de sistema y la menor se presentó en la superficie interior del muro en donde se encontraba el sistema. La diferencias de temperatura obtenidas entre las tomadas en la parte frontal de los módulos y en la parte posterior de éstos fueron de 0.97, 2.08, 3.13 y 2.68°C en promedio para las 10:00, 11:00, 12:00 y 13:00 h respectivamente. Un comportamiento similar se presentó entre las temperaturas internas superficiales del muro, tomadas en el área donde se ubicaba el sistema y en donde no, siendo de 1.18, 2.66, 3.34 y 3.50°C para las 10:00, 11:00, 12:00 y 13:00hrs respectivamente. Lo mismo se pudo corroborar con la cámara termográfica, en donde se observó una temperatura menor en el área de los módulos, siendo más contrastante a las

13:00hrs (Figura 33). Esto quiere decir que a dicha hora fue en donde se presentaron mayores diferencias de temperatura, (Ver anexo 12).

Grasas y aceites

La remoción de grasas y aceites fué de 69.77% en promedio, (Figura 34).

Este valor demuestra que si se incorporara una trampa de grasas previa-

mente, se obtendrían mayores eficiencias de remoción, (Ver anexo 13).

Cabe destacar que a pesar de existir una alta cantidad de grasas y aceites en la alimentación de agua, únicamente se vieron afectadas las plantas del H1 ya que la mayoría de las hojas se tornaron negras en las orillas y se marchitaron.



Figura 31. Crecimiento de plantas en la semana 2, 7 y 12, de izquierda a derecha.

Fuente: Elaboración propia

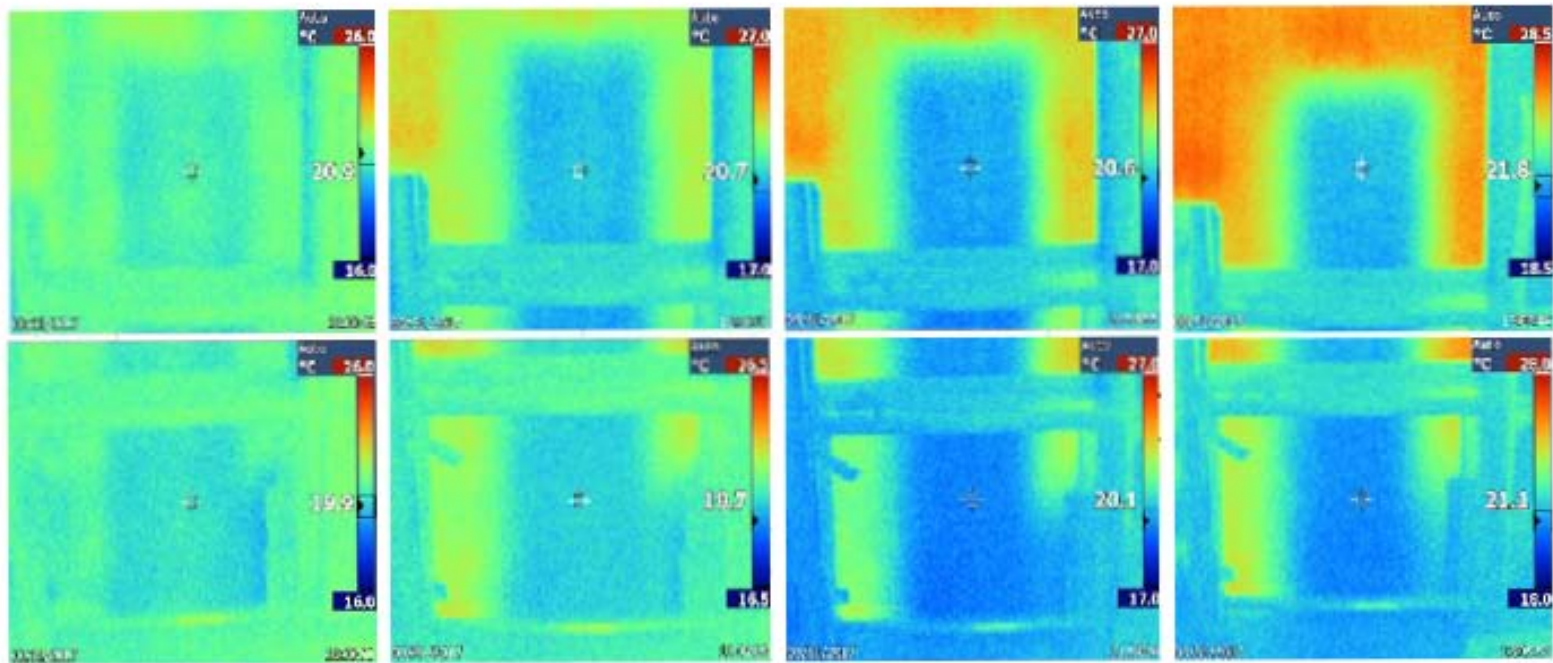


Figura 32. Fotografías tomadas con la cámara termográfica a las 10:00, 11:00 12:00 y 13:00 hrs
Fuente: Elaboración propia

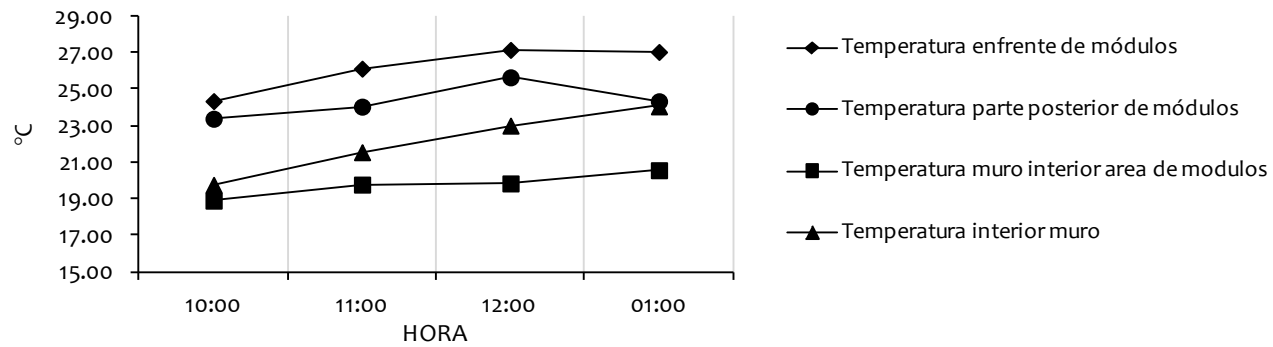


Figura 33. Diferencia de temperaturas de cada uno de los puntos tomados
Fuente: Elaboración propia

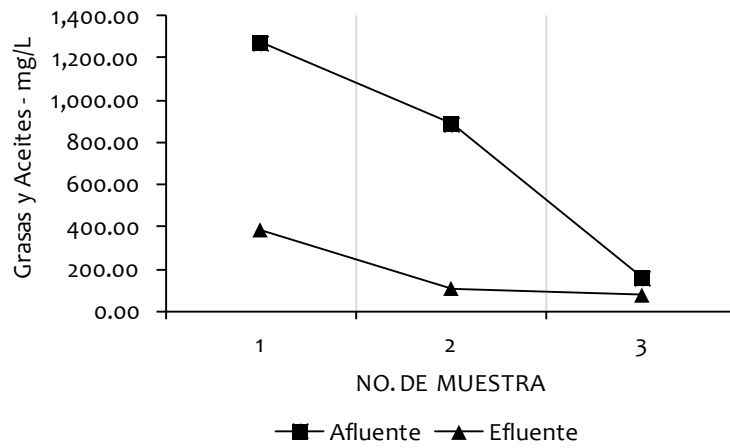


Figura 34. Concentración de Grasas y Aceites en el afluente y efluente del VERDEM
Fuente: Elaboración propia

- ◆ Temperatura enfrente de módulos
- Temperatura parte posterior de módulos
- Temperatura muro interior area de modulos
- ▲ Temperatura interior muro

Con base a los resultados obtenidos en la segunda Fase de experimentación, en la Tabla 12 se muestra un resumen de las eficiencias de remoción de los contaminantes analizados.

Tabla 12. Resumen del desempeño total del VERDEM de acuerdo al análisis de contaminantes seleccionadas

Fuente: Elaboración propia

| | DQO (mg/L) | Amoníaco (mg/L) | Nitrito (mg/L) | Nitrato (mg/L) |
|------------|------------|-----------------|----------------|-------------------------|
| Eficiencia | 97.17% | 81.99% | 0.83% | 8.33% |
| | NT (mg/L) | SST (mg/L) | Turbidez (UTN) | Grasas y Aceites (mg/L) |
| Eficiencia | 78.25% | 82.28% | 91.50% | 69.77% |

05

EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE ACUEDO A CRITERIOS SELECCIONADOS





Para medir la contribución del VERDEM de acuerdo a los criterios seleccionados, se tomó como objeto de estudio la VIS, ya que es el sector de mayor crecimiento. Para esto, se tomó como caso de aplicación el prototipo de VIS que se encuentra el conjunto urbano Geovillas de Terranova Zona Sur, Municipio de Acolman en el Edo. de México.

5.1 EL VERDEM PARA LA VIVIENDA DE INTERÉS SOCIAL; CASO DE APLICACIÓN

Se tomó como caso de aplicación el prototipo de vivienda de interés social que se encuentra el conjunto urbano Geovillas de Terranova Zona Sur. En este se observa claramente la problemática de la ZMVM en cuanto a la escasez del agua y una ineficiencia de tratamiento de aguas residuales municipales. Para conocer más a detalle la problemática de la zona, se acudió a la entidad responsable de suministrar el agua potable, conocida como el Organismo Público Descentralizado Municipal para la Prestación de los Servicios de Agua Potable, Drenaje y Tratamiento de Aguas Residuales del Municipio de Acolman (O.D.A.P.A.S.A.), con la finalidad de obtener la información al respecto. De acuerdo a la visita guiada y a la información proporcionada se establece lo siguiente:

Se cuenta con un pozo de extracción de agua proveniente de un acuífero el cual es conocido como “Pozo Real del Valle”, mismo que abastece

de agua potable a cuatro unidades habitacionales. Real del Valle Norte y Sur, fueron construidas por la inmobiliaria ARA, mientras que Geovillas de Terranova Norte y Sur, por GEO. Debido a que esta última no logró construir la infraestructura necesaria para abastecer de agua potable a sus respectivas unidades habitacionales, todas son abastecidas desde el Pozo Real del Valle, el cual es infraestructura construida por ARA, por lo que se genera una fuerte presión de demanda de agua para abastecer a los conjuntos urbanos. En este sentido, se planea a mediano plazo que las unidades de GEO se abastezcan de agua proveniente del sistema Cutzamala, lo cual implicaría generar la infraestructura pertinente.

El agua proveniente del Pozo Real del Valle, es conducida por medio de redes de distribución principal que desembocan a redes secundarias, las cuales ingresan a cada cuadrante direccionando el agua a los tanques elevados (Figura 35). Todos los tanques fueron habilitados menos el cuarto, por lo que esta unidad se abastece del tanque número tres, mientras que se defina la conexión de éste al Sistema de Cutzamala. Se estima que la cantidad de viviendas a las que se da servicio, es de aproximadamente 13,600 viviendas construidas, considerando tres habitantes por vivienda un total de 40,800 habitantes. De acuerdo a mediciones realizadas por parte del personal de ODAPASA al pozo Real del Valle, el volumen de agua total extraída desde las 8:00 h a las 7:30 h aproximadamente, es de 166,501 m³, esto quiere decir 5,741.41 m³ por día, que dividido entre





la cantidad de habitantes, se consume aproximadamente 140 L/hab./día. De acuerdo a esto, el pozo tiene la capacidad de abastecer 15 años más.


Se cuenta con una planta de tratamiento de aguas residuales basada en lodos activados. Parte del agua tratada se utiliza para el riego de áreas verdes, la cual es suministrada por medio de pipas y otra parte es expulsada a un canal abierto que se mezcla con aguas tratadas proveniente de la Central Termoeléctrica de Lechería, mismas que encausan a la laguna El Salado (Figura 35). El problema más alarmante es que durante el cauce del agua tratada hacia el lago, se contamina nuevamente ya que se observa que la gente acostumbra a tirar sus residuos dentro de ésta, además, las viviendas circundantes tiran su agua residual al canal debido a la falta de drenaje.

Uno de los problemas que más se puede percibir, es la calidad de aire a la que los habitantes se ven expuestos día a día debido a los olores que despiden la planta de tratamiento y que es fácilmente perceptible por la ubicación tan céntrica de ésta. Los olores del canal de agua tratada también son percibidos puesto que se trata de un canal a cielo abierto, provocando además que sean fácilmente contaminados. Este tipo de situaciones afecta directamente la calidad de vida de los habitantes, ya que además, se está deteriorando la imagen urbana del conjunto debido a la cantidad de residuos que se observan. Cabe destacar que al no tener un



Figura 35. Tanques elevados de, 1) Geovillas de Terranova Zona Norte, 2) Real del Valle Zona Norte, 3) Real del Valle Zona Sur, 4) Geovillas de Terranova Zona Sur - sitio de estudio), PT) Planta de Tratamiento, PE) Pozo de Extracción

Fuente: Elaboración propia



sistema de descarga de agua tratada que sea eficiente, se está perjudicando al medio ambiente puesto que no se le está retornando a la naturaleza el agua que le fue extraída.

Considerando las problemáticas particulares de este complejo habitacional, se cree pertinente el proponer el sistema VERDEM, que si bien no resolverá los problemas ya existentes del conjunto, sí podrían ayudar a mitigar el impacto ambiental que se está generando y el deterioro a la calidad de vida de los habitantes. Por tal motivo, evaluar el sistema con base en la normatividad propuesta y el sistema de certificación, es la mejor herramienta para poder medir su contribución.

5.1.1 Propuesta integral de instalación del VERDEM dentro de la VIS tipo elegida

El conjunto urbano Geovillas de Terranova, se conforma de viviendas cuádruplex, compuesta de la vivienda tipo elegida. Cada una cuenta con una superficie de construcción total de 40 m². Constan de una recámara, sala comedor, baño, cocina y un patio de servicio, además de un área ajardinada frontal con cajón de estacionamiento. Los muros son a base de block hueco de concreto con acabado de pasta texturizada en muros interiores, yeso liso con pintura esmalte en baños y cocina, con azulejo en muro. La losa es a base de concreto armado, con excepción del baño que tiene una

teja auto-impermeable de fibrocemento.

Con base en la disponibilidad de muros ciegos en la fachada de la vivienda tipo y de acuerdo a la red sanitaria existente, se realizó una propuesta integral de instalación con la que podría llegar a funcionar el VERDEM en caso de ser aplicado en una vivienda de estas características, (Ver anexo 14). En este sentido, se propuso la ubicación de dos columnas del VERDEM en la cara exterior del muro del baño y la instalación sanitaria se dividió en agua gris y agua negra direccionando cada una hacia un registro separado. Dada la distribución de la tubería sanitaria propuesta, el agua pluvial se mezclaría con el agua gris, lo cual no resulta problemático pues los HA también se han utilizado para tratar agua residual diluida con aguas pluviales, obteniendo buenos resultados, (Vymazal, 2010, p. 540).

El registro de agua gris se pensó para tener una capacidad de 100 L, que es el volumen de agua capaz de tratar el sistema, enviando el agua excedente al colector municipal por medio de un rebosadero. El agua se propone que sea bombeada hacia las columnas del VERDEM, logrando mantener el nivel del agua en los módulos gracias a un compartimiento interno dentro de éstos, sustituyendo las vueltas de tubería de PVC empleadas en el modelo de experimentación. El agua tratada se direccionaría directamente hacia el WC y hacia una llave de salida para que también se ocupe para riego. Las descargas del WC o el agua empleada para rie-

go,¹¹ reducirían el nivel de llenado de agua de los módulos, lo cual se detectaría por medio de un sensor de nivel, mismo que indicaría el momento de encendido de la bomba para lograr mantener el nivel de agua dentro del sistema en todo momento. Otro mecanismo que podría sustituir la bomba de agua y eliminar el uso de energía eléctrica es la Fuente de Herón, la cual es una máquina hidráulica que funciona a partir de la presión del aire para impulsar agua hacia arriba (Kezerashvili, & Sapozhnikov, 2003). Sin embargo debe estudiarse detalladamente para integrarse adecuadamente dentro del VERDEM.

11- Se está considerando que dentro de la vivienda habitan 4 personas y se tiene un WC con una capacidad de 4.5l/descarga, y su uso es de 5 veces día/hab., (Ver anexo 15), por lo que se estarían empleando 90l/día de agua tratada, dejando 10lts/día disponibles para riego. Si es así, se estarían consumiendo los 100lts de agua tratada diariamente, mientras que el sistema se llena diariamente de otros 100lts para su uso al siguiente día, logrando un TRH de un día.

Criterios seleccionados de la norma NMX-AA-164-SCFI-2013

| | |
|---|---------------------------------------|
| 1 | Categoría: Energía Inciso: 5.2.2.1 |
|---|---------------------------------------|

Requerimiento del Inciso:

Para limitar la ganancia de calor a través de la envolvente, el cálculo del presupuesto energético debe realizarse conforme a los valores y métodos de cálculo establecidos en las normas NOM- 008-ENER-2001 o NOM 020-ENER-2011, según corresponda a la tipología de edificación.

Contribución del VERDEM:

De acuerdo a las diferencias de temperatura obtenidas de hasta 3,5°C, se estimó que el sistema puede funcionar como un buen aislante térmico en las edificaciones. Por tal motivo, se evaluó la vivienda tipo de acuerdo a la NOM-020-ENER-2011, primero sin el sistema y después empleando el sistema, para identificar si se reducían las ganancias de calor (Ver anexo 16).

La evaluación de la vivienda tipo sin el sistema, arrojó que no cumple con la normatividad ya que la ganancia de calor del edificio proyectado es mayor que el edificio de referencia que establece la norma por un 23.87%. Realizando los cálculos empleando el sistema en la fachada, la ganancia de calor del edificio proyectado aumenta un poco más (24.03%) con respecto al edificio de referencia. Estos valores no resultaron coherentes, pues si se observa el

5.2 CRITERIOS SELECCIONADOS DE LA NORMA NMX-AA-164-SCFI-2013 Y DEL PAAS

Con base en la propuesta integral del VERDEM dentro de la VIS tipo, se procedió a evaluar cómo es que contribuye a cumplir los criterios seleccionados. A continuación, se especifican los criterios y los requerimientos de cada uno así como la contribución puntal del sistema. Se indica con “A”, que el sistema aporta en cierta medida para cumplir con dicho criterio, con “C”, que cumple completamente con dicho criterio, con “NA”, que el criterio no se puede aplicar al sistema propuesto o que no se adecúa a las necesidades de éste y con “NC”, que no cumple con el criterio:

A coeficiente global de transferencia de calor (K), obtenida de la porción del muro analizada sin el sistema, éste equivale a 1.2140 W/m²K, el cual si se compara con el valor obtenido de la porción del muro analizado con el sistema que fué de 0.660 W/m²K, se observa una disminución de transferencia de calor de más del 50%. Por tal motivo, se identificó que el problema radica en las temperaturas interiores y equivalentes que fija la norma de acuerdo al sitio geográfico de estudio y orientación, que colocan al edificio teniendo mayores temperaturas en el interior que en el exterior, lo cual en vez de tener ganancias de calor, tiene pérdidas de calor, que se reflejan en valores negativos. Así que a pesar de que el VERDEM tenga un valor K muy bajo que ayude a disminuir las ganancias de calor en la envolvente, la norma no reflejara los beneficios reales del sistema debido a los valores que establece y que no se apegan a la realidad, pues no siempre se tendrán pérdidas de calor en la vivienda ya que las temperaturas que se presentan a lo largo del año pueden variar y la norma fija una temperatura promedio para todo el cálculo de las ganancias de calor.

2 Categoría: Agua
Inciso: 5.2.3.2

Requerimiento del Inciso:
El diseño del sistema hidráulico de la edificación debe lograr una reducción en el consumo de agua de al menos 20 %, con respecto al consumo de una edificación equivalente, calculado según el Apéndice Informativo 8.

Contribución del VERDEM:
C De acuerdo a los calculos realizados conforme al Apéndice 8 de la norma y considerando 4 habitantes dentro de la vivienda, se obtuvo un consumo de agua neto en el caso propuesto de 405.49 L/día, esto empleando ecotecnologías ahorradoras de agua y considerando la reutilización del agua tratada del sistema. Sin embargo, no se reflejan ahorros de agua ya que comparándolo con el caso base que establece la norma, se tiene un déficit de -1.37%. Este resultado se debió a que el consumo que establece la norma para el caso base de acuerdo al sitio de estudio, es del 100 L/Hab./día., es decir; 400 L/día. el cual no es realista. En cambio si se toma como caso base un consumo de 140 L/Hab./día, (esto de acuerdo a las mediciones realizadas por O.D.A.P.A.S.A.) se puede ver reflejado un ahorro de agua del 27.59% (Ver Anexo 15).

3 Categoría: Agua
Inciso: 5.2.3.7

Requerimiento del Inciso
Hasta un 30 % de las aguas residuales se pueden enviar al alcantarillado público y deben cumplir con los límites permisibles de contaminantes que establece la normatividad vigente. El resto se envía a una planta de tratamiento para su uso posterior en riego, uso en excusados y otros fines. Los límites máximos permisibles de contenido de contaminantes en las aguas residuales tratadas y que se vayan a reusar deben cumplir con la norma NOM-003-SEMARNAT

Contribución del VERDEM
A De acuerdo a los cálculos realizados en el criterio anterior, arrojó que la cantidad de agua residual producida por cuatro personas en el caso propuesto es de 505.49 L, en donde se tratan 100L de agua gris que corresponde al 24.66%. El agua residual restante se estaría enviando al alcantarillado, correspondiente a un 75.37%, por lo que no cumple con el criterio, (Ver anexo 15). Por otro lado indica que el agua tratada debe cumplir con los límites máximos permisibles de la NOM-003-SEMARNAT:

De acuerdo a los contaminantes establecidos en dicha norma en esta investigación sólo se analizaron Grasas y Aceites, DBO y SST, debido a que en agua de alimentacionn empleada, que era agua sintética en mayor porcentaje, era muy poco probable que contuviera los demás contaminantes que establece la norma que son Coliformes Fecales y Huevos de Helminto, pues son contaminantes que se encuentran normalmente en las aguas negras. Sin embargo es importante llevar a cabo dichos análisis en un caso de aplicar el sistema en condiciones reales.

En cuanto a los demás parámetros, se consideraron los límites máximos establecidos para un tipo de reúso de contacto indirecto u ocasional. Para Grasas y Aceites, se obtuvo un valor de 190 mg/L en promedio en el efluente, por lo que no cumple con el límite máximo establecido, sin embargo esto podría mejorar considerablemente si se emplea la trampa de grasas y aceites propuesto en la instalación integral. Por otro lado, la DBO₅ se sustituyo por el análisis de la DQO debido a que es un análisis más fácil de realizar y menos tardado, además de que mide tanto la materia orgánica como la inorgánica, mientras que la DBO₅ sólo mide la materia orgánica, por lo que el valor de la DQO siempre será mayor que la DBO. De acuerdo a los resultados obtenidos, se obtuvieron valores de DQO de entre 0 a 6 mg/L en el efluente, para el periodo de alimentación en donde se empleó agua sintética, y valores de 78 a 165 mg/L cuando se alimentó el sistema con agua gris. Sin embargo estos últimos valores no se van a considerar ya que estos últimos valores no corresponden a la de un agua gris doméstica, si no a la de un agua residual de alta concentración. En cambio las del agua artificial sí corresponden, por lo que el sistema sí cumplió con el límite máximo establecido. Por último en cuanto a los SST, se obtuvieron valores de 0 a 13.33 mg/L en el efluente, lo cual también cumple con lo establecido en la norma (Tabla 13).

Tabla 13.- Límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas y resultados obtenidos con el VERDEM

Fuente: Adaptado de la NOM-003-SEMARNAT-1997, Tabla 1

| Tipo de Reúso | Contaminantes no analizados | | | Contaminantes analizados | | | | |
|--|----------------------------------|-----------------------------|----------------------------|----------------------------|-------------------------|---------------------------|-------------------------|-------|
| | Coliformes fecales NMP/100 mL | Huevos de Helminto (h/L) | Grasas y Aceites (mg/L) | DBO ₅ (mg/L) | | SST (mg/L) | | |
| | Límite máximo permisible | Límite máx. permisible | Resultados obtenidos | Límite máx. permisible | Resultados obtenidos | Límite máx. permisible | Resultados obtenidos | |
| Servicios al público con contacto directo ^a | 240 | > 1 | 15 | NA | 20 | NA | 20 | NA |
| Servicios al público con contacto indirecto y ocasional ^b | 1000 | < 5 | 15 | 190 | 30 | 0 a 6 | 30 | 13.33 |

^a Es el que se destina a actividades donde el público usuario esté expuesto directamente o en contacto físico. En lo que corresponde a esta Norma Oficial Mexicana se consideran los siguientes reusos: llenado de lagos y canales artificiales recreativos con paseos en lancha, remo, cantonaje y esquí; fuentes de ornato, lavado de vehículos, riego de parques y jardines

^b Es el que se destina a actividades donde el público usuario esté expuesto indirectamente o en contacto físico incidental y que su acceso es restringido, ya sea por barreas físicas o personal de vigilancia. En lo que corresponde a esta Norma Oficial Mexicana se consideran los siguientes reusos: riego de jardines y camellones en autopistas; camellones en avenidas, fuentes de ornato, campos de golf, abastecimiento de hidrantes de sistemas contra incendi, lagos artificiales no recreativos, barreras hidráulicas de seguridad y panteones.

4 Categoría: Agua
Inciso: 5.2.3.16

Requerimiento del Inciso

Se debe contar con un correcto tratamiento de los escurrimientos pluviales, que elimine los sólidos, aceites y grasas en la misma.

Contribución del VERDEM:

C Este criterio sólo aplica para las aguas pluviales, sin embargo debería de extenderse para tratar agua gris ya que en esta es en donde se encuentra una mayor cantidad de aceites y grasas. Es por eso que se propuso agregar una trampa de grasas y aceites después de la tarja dentro de la propuesta integral del sistema, cumpliendo así, con este criterio.

5 Categoría: Calidad de ambiente y responsabilidad social
Inciso: 5.2.5.1.8

Requerimiento del Inciso:

Se pueden incluir elementos de naturación añadidos, es decir, adicionales al porcentaje de área verde establecido, estos elementos pueden ser terrazas, bardas, techos y muros verdes. El sistema que se instale debe considerar:

- *Un consumo de agua eficiente
- * Que las raíces no dañen la estructura
- * Preparar la estructura de la edificación para soportar la carga extra
- * Un riego adecuado para el correcto crecimiento de las plantas.

En el caso de azoteas y terrazas, se debe prever el desalojo del agua de lluvia, ya sea que se conduzca al drenaje o que se aproveche como sistema de captación y regulación de los escurrimientos pluviales.

Contribución del VERDEM

C El sistema tiene un consumo de agua eficiente ya que no está utilizando agua potable, si no agua gris que es producida dentro de la edificación la cual contiene los nutrientes necesarios para el correcto crecimiento de las plantas. El sistema de riego es adecuado ya que permite el correcto funcionamiento del VERDEM. Por otro lado, debido a que es un sistema modular aislado a la fachada, las raíces no entran en contacto con la estructura de la edificación por lo que no es dañada. En cuanto al peso, se considera que se debe emplear los taquetes adecuados de acuerdo al muro en el que se va a anclar, esto tomando en cuenta que tiene un peso de 154kg/m² cuando se encuentra saturado de agua.

6 Categoría: Calidad de ambiente y responsabilidad social
Inciso: 5.2.5.1.9

Requerimiento del Inciso:

Los elementos naturales (árboles y vegetación) del área verde deben aprovecharse, como elementos que pueden ayudar a mejorar las condiciones ambientales de la edificación, a través de:

- *Generar sombras cuando se quiera reducir los asoleamientos y permitir su paso cuando se requiera ganar calor
- *Proteger de los vientos o redirigirlos
- *Amortiguar el ruido
- *Atrapar partículas suspendidas en el aire
- *Estabilización de suelos y control de la erosión.

Contribución del VERDEM:

C Un muro verde contribuye en gran medida a mejorar las condiciones ambientales anteriormente mencionadas, esto de acuerdo a la investigación realizada, por lo que el VERDEM logra cumplir con este criterio excepto la estabilización del suelo y control de la erosión ya que no aplica para este tipo de sistemas

7 Categoría: Calidad de ambiente y responsabilidad social

Inciso: 5.2.5.2.1

Requerimiento del Inciso:

Los muros de colindancia o fachadas ciegas pueden contar con un recubrimiento igual al de la textura y color de las otras fachadas del edificio o tener un recubrimiento vegetal.

Contribución del VERDEM:

C El sistema conforma un recubrimiento vegetal, por lo que se cumple con este criterio

8 Categoría: Calidad de ambiente y responsabilidad social

Inciso: 5.2.5.2.6

Requerimiento del Inciso:

Se puede dar mantenimiento a las fachadas, incluyendo fachadas ciegas o muros de colindancia asegurando el adecuado estado del recubrimiento, incluido el recubrimiento vegetal.

Contribución del VERDEM:

C La ventaja del empleo de muros verdes en las fachadas es que el mantenimiento que se le da a ésta se limita a remover hojas secas y sustituir plantas.



Criterios seleccionados del Programa de Acción Ambiental Sustentable

Categoría: Energía

1

Criterio: PCES-ENER-I.1.1. Eficiencia de la envolvente

Requerimiento del Criterio

Demostrar características de diseño eficiente en fachada, techos y muros, incluyendo el uso de materiales de construcción con propiedades aislantes. Se deberán presentar las memorias de cálculo de la ganancia de calor de la envolvente conforme a las normas oficiales mexicanas NOM-008-ENER-2001, “Eficiencia energética en edificaciones, envolvente de edificios no residenciales” y NOM-020-ENER-2011, “Eficiencia energética en edificaciones, envolvente de edificios residenciales”.

Contribución del VERDEM

A

Este criterio tiene el mismo requerimiento que el de la norma NMX-AA-164-SCFI-2013, en su inciso 5.2.2.1, por lo que la contribución del VERDEM es la misma que se explica en este.

Categoría: Agua

2

Criterio: PCES-AG II.2.1. Instalación de plantas de tratamiento de aguas residuales y reúso

Requerimiento del Criterio

a) Instalación de una planta de tratamiento de aguas residuales que cumpla con la calidad de agua tratada requerida por la norma NOM-003-SEMAR-NAT-1997 “Límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público”, en su variante servicios al público con contacto directo, cuando los usos del agua tratada sean los contemplados en dicha norma.

b) Para el aprovechamiento en otro tipo de servicios (lavado de pisos exteriores y banquetas, así como la descarga de sanitarios), la planta de tratamiento deberá cumplir con la calidad de agua tratada arriba especificada pero contará al final del proceso con un sistema de filtración a presión y con una segunda operación de desinfección a la salida del filtro; al menos una de las dos operaciones de desinfección deberá hacerse utilizando el hipoclorito u otros métodos.

c) La instalación deberá contar con todas las medidas de seguridad para el almacenamiento y el uso de reactivos, y habrá de considerarse el adecuado manejo de residuos generados durante el proceso (material sólido y lodos), así como el control de posibles impactos negativos, como la presencia de insectos, olores y ruido.

d) Es condición indispensable para la reutilización del agua residual tratada instalar una red de agua específica que conduzca el líquido tratado a los sitios de aprovechamiento y una cisterna de agua tratada; ello implica un sistema independiente al utilizado para distribuir el agua potable de la red municipal.

e) El sistema de tratamiento podrá recibir las aguas grises o bien la combinación de aguas grises y negras. En este caso, las aguas grises no incluirán las provenientes de sanitarios (inodoros y mingitorios) ni de cocinas o cafeterías.

Contribución del VERDEM

| | |
|----|---|
| C | a) Este inciso del criterio tiene el mismo requerimiento que el de la norma NMX-AA-164-SCFI-2013, en su inciso 5.2.3.7, por lo que la contribución del VERDEM es la misma que se explica en este. |
| NC | b) En la instalación propuesta no se incluye un sistema de filtración ni de hipoclorito, por lo que no se está cumpliendo con este inciso del criterio. |
| C | c) El tipo de tratamiento de agua propuesto no requiere del uso de ningún tipo de reactivo ni genera residuos o ruido. Tampoco despiden olores ya que la lámina de agua no se encuentra en la superficie, si no por debajo del sustrato. Es posible que genere insectos pero son los que comúnmente viven en las plantas. |
| C | d) Se está proponiendo una tubería independiente para conducir el agua tratada directamente hacia el WC |
| NA | e) En este caso, las aguas grises incluyen las provenientes de la cocina ya que contienen nutrientes que son aprovechables para las plantas, por lo que este inciso no está acorde a las necesidades del sistema de tratamiento propuesto. |

Categoría: Calidad de Vida y Responsabilidad Social

3

Criterio: PCES-CV-IV.1. Naturación de azoteas

Requerimiento del Criterio

a) Para la validación de este criterio es necesario que el sistema de naturación horizontal y/o vertical abarque un área mínima correspondiente a 40% de la azotea de la edificación, según lo establecido por la norma ambiental NADF-013-RNAT-2007 “Especificaciones técnicas para la instalación de sistemas de naturación en el Distrito Federal”.

b) Deberá realizarse un listado de especies nativas o endémicas del Valle de México que favorezcan la fijación de CO₂ y cumplan con las normas ambientales NADF-013-RNAT-2007 y NADF-006-RNAT-2004 “Requisitos, criterios, lineamientos y especificaciones técnicas que deben cumplir las autoridades, personas físicas o morales que realicen actividades de fomento, mejoramiento y mantenimiento de áreas verdes públicas”.

c) El riego deberá hacerse con agua pluvial o tratada; esto dependerá del tipo de naturación seleccionada (extensiva, semintensiva, intensiva).

d) Selección de otras áreas para naturar (naturación vertical). En caso de que no sea factible técnicamente naturar la azotea o cualquier tipo de cubierta del cuerpo del edificio, se podrá optar por naturar en área libre no permeable (muro ciego, bardas perimetrales del edificios), guardando las mismas proporciones que en la naturación horizontal.

Contribución del VERDEM

| | |
|----|---|
| NA | a) No aplica este inciso ya que es para azoteas naturadas |
|----|---|

| | |
|----|---|
| A | b) Ninguna de las especies empleadas es nativa o endémica de México, pero pueden favorecer la fijación de CO ₂ en mayor o menor medida, dependiendo de la especie de la que se trate. Para esto será necesario un estudio más detallado. |
| NA | c) Para el riego del sistema se emplea agua gris tratada, por lo que este inciso no está acorde a las necesidades del sistema de tratamiento propuesto. |
| A | d) Se está cubriendo un 13.96% de la superficie total de la fachada |

4 Categoría: Calidad de Vida y Responsabilidad Social
 Criterio: PCES-CV-IV.g. Proveer de áreas verdes

Requerimiento del Criterio

Reducir el efecto isla de calor al generar áreas verdes que además funcionen como espacios de encuentro y relajación para los usuarios, permanentes y flotantes, de la edificación, así como la integración con el medio natural. Cabe mencionar que estos espacios serán zonas libres de humo de cigarrillo. Los requerimientos están estipulados en el criterio.

Contribución del VERDEM

| | |
|---|--|
| C | De acuerdo a la investigación realizada, los muros verdes contribuyen a reducir el efecto isla de calor y a promover espacios de relajación y encuentro. |
|---|--|

Con base en los demás criterios identificados que fueron establecidos en la Tabla 6 de esta investigación y no fueron analizados, en la Tabla 14 se mencionan las posibles contribuciones del sistema en caso de realizarse

los estudios pertinentes, ya sea dentro de una VIS o en cualquier tipo de edificación en donde se implemente.

Tabla 14. Criterios no analizados en esta investigación

Fuente: Elaboración propia

| Criterios del PAAS | Requerimiento (Resumen) | Posibles contribuciones del VERDEM |
|-------------------------|--|--|
| Energía PCES-ENER-I.1.2 | Este criterio requiere eliminar o reducir el uso del aire acondicionado por medio de estrategias bioclimáticas, entre estos, optimizar el desempeño de la envolvente. Solicita un estudio bioclimático extenso | El sistema se podría implementar como un elemento de diseño bioclimático, para medir su contribución dentro del estudio bioclimático que solicita este criterio. |

| | | | |
|--|-----------------|--|--|
| Agua | PCES-AG-II.1.1. | Requiere la instalación de un sistema de captación y aprovechamiento de agua pluvial, agregando un dispositivo para evitar la entrada de los primeros escurrimientos. La calidad de agua debe cumplir con la norma NOM-127-SSA1-1994. | El sistema tiene la posibilidad de tratar agua pluvial para su aprovechamiento, por lo que se podría adaptar una instalación para evitar la entrada de los primeros escurrimientos pluviales y analizar la calidad de agua resultante del tratamiento para evaluar su cumplimiento con la norma que solicita este criterio |
| Calidad de Vida y Responsabilidad Social | PCES-CV-IV.5. | Hace referencia al control de los niveles de ruido dentro de las edificaciones en donde se emita ruido a través del empleo de diferentes estrategias, entre estas cubiertas vegetales. Solicita cumplir los límites máximos permisibles estipuladas en diferentes normas | El sistema podría ser evaluado dentro de una Cámara de Transmisión para medir su capacidad de aislación acústica y evaluar su contribución en este criterio, en caso de que se tratara de una edificación que emita ruido. |
| Impacto Ambiental y Otros Impactos | PCES-IA-V.3. | Promueve el uso de productos biodegradables para limpieza y mantenimiento | El proceso de tratamiento del VERDEM sería más eficiente si se emplearan productos biodegradables para la limpieza, pues se descomponen rápidamente |

| Criterios de la NMX-AA-164-SCFI-2013 | | Requerimiento (Resumen) | Posibles contribuciones del VERDEM |
|--------------------------------------|-----------|--|---|
| Energía | 5.2.2.2 | Requiere reducir las ganancias de calor al menos un 10% con respecto al edificio de referencia, esto respecto a la NOM- 008-ENER-2001 o NOM 020-ENER-2011, según corresponda | Vale la pena analizar cómo es que el sistema puede cumplir con dicho criterio en cualquier tipo de edificación si abarcara una mayor cantidad de área en la envolvente, dependiendo del área disponible en ésta y su orientación. |
| Agua | 5.2.3.5 | Dentro de éste, se requiere lo mismo que el criterio PCES-AG-II.1.1. | Se propone lo mismo que se menciona en el criterio PCES-AG-II.1.1. |
| Biodiversidad | 5.2.5.1.5 | Dice que el manejo del paisaje del área verde debe buscar una integración con el entorno, generar identidad, y contribuir a la calidad estética del conjunto. | Si bien los muros verdes contribuyen con los aspectos mencionados en este criterio, es importante que se evalúe cualitativamente una vez sea implemente el sistema en la edificación. |
| Paisaje | 5.2.5.2.2 | Requiere realizar una evaluación de impacto visual de la edificación y su paisaje | El sistema podría mejorar el impacto visual de una edificación, por lo que vale la pena evaluar la edificación integrando el sistema. |
| Calidad del ambiente interior | 5.2.5.3.1 | Requiere que existan parámetros de confort dentro del edificio con temperaturas entre los 18 y 25°C, favoreciendo soluciones bioclimáticas sobre las mecánicas | Esto se podría evaluar una vez implementando el sistema dentro de la edificación |





CONCLUSIONES





Para lograr los objetivos establecidos en esta investigación, se analizaron los diferentes tipos de HA existentes, en donde se obtuvo que los HAFVSS eran los más eficientes para tratar agua gris y por el otro lado se analizaron los diferentes sistemas de muros verdes, en donde se obtuvo que los compuestos con base en un sistema modular generaba mayores ventajas ambientales. Gracias a la integración de las propiedades más benéficas de cada sistema se logró construir un modelo de experimentación que tiene el potencial de ser implementado como un sistema de tratamiento descentralizado de agua gris para la VIS. También se demostró que el sistema es capaz de contribuir con el cumplimiento de los criterios seleccionados de la norma NMX-AA-164-SCFI-2013 y del PAAS, por lo que la hipótesis planteada también se comprobó.


De la norma NMX-AA-164-SCFI-2013 y el PAAS

El empleo de dichos instrumentos para la evaluación del VERDEM, demostró que la tecnología desarrollada funciona como un sistema multifuncional ya que posee diversas características que fomentan la sustentabilidad en las edificaciones, además de que es una tecnología que se puede implementar en diferente tipo de edificaciones. Sin embargo cuando se evaluó el sistema, se detectó que la mayoría de los criterios carecen de precisión para determinar el procedimiento necesario para realizar los cálculos solicitados. Esto sucedió sobre todo al tratar de evaluar los porcentajes de ahorro de agua requeridos, pues el PAAS no establece ninguno dentro

de su libro blanco y en la norma NMX-AA-164-SCFI-2013, tampoco se establece al calcular el caso propuesto, por lo que se procedió a emplear el procedimiento utilizado en el sistema de certificación LEED. También se detectó que el parámetro que establece para determinar los consumos de agua en el caso base para vivienda popular no es realista, lo cual no permitió generar ahorros de agua a pesar de que en el caso propuesto se emplearon diferentes ecotecnologías y se estableció la reutilización del agua tratada del VERDEM. Lo mismo se pudo observar al evaluar el sistema con respecto a la NOM 020-ENER-2011, ya que a pesar de que se obtuvo una Conductividad Térmica (K) menor empleando el VERDEM en la fachada, esto no se vio reflejado al momento de calcular las ganancias de calor debido a que la norma fija temperaturas internas mayores a las equivalentes, esto de acuerdo al sitio de ubicación y orientación de la vivienda, lo cual establece pérdidas de calor en vez de tener ganancias de calor dentro de ésta, situación que no se apega a la realidad pues no se tienen las mismas temperaturas todo el año. Por tal motivo la norma no reflejó las ventajas térmicas del sistema.

Por otro lado, también se identificó que en la NMX-AA-164-SCFI-2013 hace mayor énfasis en el aprovechamiento del agua pluvial y del agua residual, que en el agua gris, por lo que los cálculos se adaptaron para incluir este tipo de agua y demostrar que su uso también permite ahorros en agua potable.





Adicionalmente, resultó evidente que ambas normatividades no se ajustan a las necesidades del VERDEM, pues solicitan características específicas que no le benefician al sistema para su correcto funcionamiento. Esto demuestra que dichas normatividades no se encuentran preparadas para incluir otro tipo de tecnologías, por lo que se tendrían que hacer excepciones cuando se usen tecnologías particulares.

Del diseño y proceso de experimentación del VERDEM

El diseño de una columna de VERDEM resulto tratar 100 L/día en un área de 1.2m², con un peso de 154 kg/m², cuando está saturado de agua. Si se toma en cuenta que una persona produce alrededor de 380 L/día (CONAGUA, 2015), y un 65% corresponde al agua gris, es decir 247 L/día, entonces 3m² del VERDEM estaría tratando un poco más del 100% del agua gris producida por habitante por día. Esto indica que el espacio requerido por persona para este sistema entra dentro del intervalo presentado a nivel mundial de los sistemas de tratamiento de agua residual basados en HA que va de 1 a 3.2m² hab/día.

En cuanto al proceso de experimentación, cabe destacar que se requirió analizar una mayor cantidad de parámetros de calidad de agua que no se solicita dentro de las normas oficiales, pues era necesario comprobar a partir de éstos análisis que se estuvieran llevando a cabo los procesos microbianos esperados dentro de un HA para lograr obtener los resulta-

dos deseados. Dado lo anterior, el análisis de dichos contaminantes tanto en la primera fase como en la segunda, conformó buena parte de esta investigación.

Recomendaciones e investigaciones futuras

Para complementar la experimentación realizada en esta investigación, se recomienda que el VERDEM sea instalado en una vivienda bajo condiciones reales y de acuerdo a la propuesta integral, para ser evaluado nuevamente en cuanto al funcionamiento hidráulico y calidad de agua resultante. Para esto, se recomienda que los módulos se construyan de un material que sea resistente a la intemperie, que sean ligeros, irrompibles y libre de fugas, pues los construidos en acrílico presentaron problemas de fugas entre la unión de planos. Esto requirió que se sellaran y llenaran de agua repetidamente para comprobar que no existieran más fugas, lo cual provocó un retraso en la experimentación. Es por esto que el material recomendado para la construcción de los módulos, sean de Polietileno de Alta Densidad, fabricado por inyección o rotomoldeo. Se sugiere este material debido a que cumple con las características anteriores. Se recomienda que dentro del diseño del módulo se considere el compartimiento interno propuesto para la nivelación de la lámina de agua.

Se recomienda aumentar el diámetro de los orificios hechos en la tubería horizontal que atraviesa los módulos para la caída del agua ya que

los Sólidos Totales contenidos en el agua los llegan a tapar y el agua deja de fluir. También es importante que la altura actual de dicho tubo se baje unos milímetros ya que obstruye un poco los orificios de fijación del módulo en donde se colocan los taquetes.

Por otro lado, la implementación del VERDEM en condiciones reales, implica un reto cultural y social importante, pues requiere una modificación de costumbres. Es por esto que se recomienda educar a los usuarios para promover el buen entendimiento y manejo del sistema, enfatizando los beneficios de éste, y sugiriendo el uso de jabones biodegradables, idealmente y que no se utilice cloro, ya que este mataría las bacterias encargadas de llevar a cabo el proceso de tratamiento.

En cuanto a las investigaciones futuras, se recomienda analizar la conductividad térmica y capacidad de aislamiento acústico del sistema por medio de estudios de laboratorio, así como su capacidad de tratamiento de agua pluvial para su potabilización. De igual forma, se recomienda llevar a cabo un estudio de impacto visual de una edificación y su paisaje, utilizando el sistema, además de estudiar su contribución para integrar el entorno y generar identidad. Estas investigaciones ayudarían a que el sistema sea evaluado con respecto a los criterios que no fueron analizados en esta investigación.

También se recomienda experimentar con otro tipo de especies ornamentales para evaluar su capacidad de soportar suelos saturados de agua y exposición solar, así como su evaluación en cuanto a la capacidad de absorción de contaminantes, para entonces seleccionar las más eficientes para el sistema. Con mayores experimentaciones, se podría mejorar la eficiencia de remoción de contaminantes del sistema para lograr cumplir con la norma NOM-127-SSA1-1994- Salud ambiental, Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización.

Finalmente, se recomienda además experimentar con el mecanismo de funcionamiento de la Fuente de Herón, para sustituir la bomba de agua sumergible y eliminar el uso de energía eléctrica dentro del sistema.





REFERENCIAS





Publicaciones de Gobierno:

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) (2015), Cuidemos y Valoremos el agua que mueve México, SEMARNAT. Recuperado de: http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/carrera_agua_2015.pdf

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) (2014^a). Atlas del Agua en México 2014. Recuperado de: <http://www.conagua.gob.mx/Contenido.aspx?n1=3&n2=60&n3=606>

Comisión Nacional del Agua, (CONAGUA) (2014^b). Situación del subsector agua potable, alcantarillado y saneamiento, Edición 2014, México, SEMARNAT. Recuperado de: <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/SGAPDS-6-14.pdf>

Comisión para la Cooperación Ambiental, (CCA) (2008). Edificación Sustentable en América del Norte, Informe del Secretariado al Consejo conforme al artículo 13 del Acuerdo de Cooperación Ambiental de América del Norte. Montreal: Comisión para la Cooperación Ambiental.

Comisión Nacional de Fomento a la Vivienda, (CONAFOVI) (2005). Uso eficiente del agua en desarrollos habitacionales, 1ra edición, México D.F., pp. 9-60. Recuperado de: http://www.cmic.org/mnsectores/vivienda/2009/Biblioteca/CONAVI/Guia_Uso_Eficiente_del_Agua.pdf

Ley de Aguas Nacionales (2016), México, Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, Secretaría General Secretaría de Servicios Parlamentarios Recuperado de: http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/16_240316.pdf

Secretaria del Medio Ambiente, (SEDEMA) (2012). Programa de Certificación de Edificaciones Sustentables, México D.F., Gobierno del Distrito Federal. Recuperado de: http://martha.org.mx/una-politica-con-causa/wp-content/uploads/2013/09/15_Certificacion-Edificaciones-Sustentables.pdf

NMX-AA-164-SCFI-2013, Edificación Sustentable.- Criterios y Requerimientos Ambientales Mínimos, Secretaria de Economía, Recuperado de: <http://www.haciendoeco.com.mx/resources/nmx-aa-164-sc-fi-2013-1.pdf>

NMX-AA-005-SCFI-2000, Análisis de agua - determinación de grasas y aceites recuperables en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba, Secretaria de Economía, Recuperado de: <ftp://ftp.conagua.gob.mx/IFAI/2016/SIS1610100091616/C5/NormaOficialMexicana/NMX-AA-005-SCFI-2000.pdf>

NMX-AA-034-SCFI-2001, Análisis de agua - Determinación de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba, Secretaria de Economía, Recuperado de: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166146/nmx-aa-034-scfi-2015.pdf>



NOM-020-ENER-2011, Eficiencia energética en edificaciones.- Envolverte de edificios para uso habitacional, Secretaría de Energía, Recuperado de: http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5203931&fecha=09/08/2011

NOM-003-SEMARNAT-1997, Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicio al público, Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, Recuperado de: <http://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/3297/1/nom-003-semarnat-1997.pdf>

Artículos de revista:

Arias I., Carlos A.; Brix, Hans (2003). "Humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales", Ciencia e Ingeniería Neogranadina, núm. 13, pp. 17-24. Recuperado de: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=91101302>

Belmont, M. A., & Metcalfe, C. D. (2003). *Feasibility of using ornamental plants (Zantedeschia aethiopica) in subsurface flow treatment wetlands to remove nitrogen, chemical oxygen demand and nonylphenol ethoxylate surfactants—a laboratory-scale study*. Ecological Engineering, 21(4), 233-247.

Brix, H. (1993). "Wastewater treatment in constructed wetlands: system design, removal processes, and treatment performance" Constructed wetlands for water quality improvement, pp, 9-22.

Buraglia, M., Alarcón, D., & Triana, M. (2011). "Jardines verticales y sistemas botánicos en entornos urbanos", MasD, pp. 50-64. Recuperado de: <http://masd.unbosque.edu.co/sites/default/files/pdf-9-jardines-verticales-y-sistemas-botanicos-en-entornos-urbanos.pdf>

Dominínguez Patiño, M. L., Rodríguez-Martínez, A., & Jasso-Castillo, L. A. (2012). "Design and Implement a System of Wastewater Treatment Based on Wetlands. Journal of Systemics", Cybernetics and Informatics, 6-11.

Fuller, R. A., Irvine, K. N., Devine-Wright, P., Warren, P. H., & Gaston, K. J. (2007). "Psychological benefits of greenspace increase with biodiversity" Biology letters, Vol. 3, No. 4, pp. 390-394. Recuperado de: <http://rsbl.royalsocietypublishing.org/content/3/4/390.short>

Jingping, Z., Kai, C., & Baozeng, S. (2009). "Analysis of correlation between microbe quantity and purification effect of hydroponics chlorophytum comosum wastewater purification system", Technology of Water Treatment, 6, 007.

Köhler, M. (2008). "Green facades- a view back and some visions", Urban Ecosystems, Vol. 11, No. 4, pp. 423-436. Recuperado de: <http://link.springer.com/article/10.1007/s11252-008-0063-x>

Langergraber, G., & Muellegger, E. (2005). "Ecological Sanitation- a way to solve global sanitation problems?", Environment international, Vol. 31, No. 3, pp. 433-444. Recuperado de: <http://www.sciencedirect.com.pbid.unam.mx:8080/science/article/pii/S016041200400145X>

- Lahera Ramón, Virginia (2010). "Infraestructura Sustentable: Las Planas de Tratamiento de Aguas Residuales", Quivera, Vol. 12, No. 2, pp. 58-69. Recuperado de: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=40115676004>
- Liu, C., Xia, H., Jian, S., Rf N, H., Zhang, Q., Zhang, T., & Lu, S. (2007). "Sewage Treatment with Constructed Wetland of Multiplayer Plants Configuration in South China", In The Proceedings of the China Association for Science and Technology (Vol. 3, No. 1, pp. 766-772).
- Manso, M., & Castro-Gomes, J. (2015). "Green wall systems: A review of their characteristics", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 41, pp. 863-871. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/266078897_Green_wall_systems_A_review_of_their_characteristics.
- Masi, F., Bresciani, R., Rizzo, A., Edathoot, A., Patwardhan, N., Panse, D., & Langergraber, G. (2016). "Vertical Gardens for greywater treatment and recycling in dense urban areas: a case-study in Pune", Journal Of Water, Sanitation And Hygiene For Development, Vol. 6, No. 2, pp. 342-347. Recuperado de: <http://dx.doi.org/10.2166/washdev.2016.019>
- Pérez, G., Coma, J., Martorell, I., & Cabeza, L. F. (2014). "Vertical Greenery Systems (VGS) for energy saving in buildings: A review", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 39, pp. 139-165. Recuperado de: <http://repositori.udl.cat/handle/10459.1/48888>
- Perini, K., Ottelé, M., Haas, E. M., & Raiteri, R. (2011^a). "Greening the building envelope, facade greening and living wall systems" Open Journal of Ecology, Vol. 1, No. 01, pp. 1-8. Recuperado de: <http://file.scirp.org/Html/5146.html>
- Perini, K., Ottelé, M., Fraaij, A. L. A., Haas, E. M., & Raiteri, R. (2011^b). "Vertical greening systems and the effect on air flow and temperature on the building envelope", Building and Environment, Vol. 46, No. 11, pp. 2287-2294. Recuperado de: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S036013231100148X>
- Perini, K., & Rosasco, P. (2013). "Cost benefit analysis for green façades and living wall systems", Building and Environment, Vol. 70, No. 11, pp. 110-121. Recuperado de: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132313002382>
- Sheweka, S., & Magdy, A. N. (2011). "The living walls as an approach for a healthy urban environment", Energy Procedia, Vol. 6, pp. 592-599. Recuperado de: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610211014792>
- Timur, Ö. B., & Karaca, E. (2013). "Vertical Gardens. Advances in Landscape", Environmental Sciences, Recuperado de: <http://www.intechopen.com/books/howtoreference/advances-in-landscape-architecture/vertical-gardens>
- Valipour, A., & Ahn, Y. H. (2016). "Constructed wetlands as sustainable eco-technologies in decentralization practices: a review", Environmental Science and Pollution Research, Vol. 23, No. 1, pp. 180-197.



- Vymazal, J., Brix, H., Cooper, P. F., Haberl, R., Perfler, R., & Laber, J. (1998). "Removal mechanisms and types of constructed wetlands", *Constructed wetlands for wastewater treatment in Europe*, pp. 17-66. Recuperado de: <https://www.researchgate.net/publication/230563461>
- Vymazal, J., Greenway, M., Tonderski, K., Brix, H., & Mander, Ü. (2006). "Constructed wetlands for wastewater treatment", *Ecological Studies*, Vol. 190, pp. 69-96
- Vymazal, J. (2010). "Constructed wetlands for wastewater treatment", *Water*, Vol. 2, No. 3, pp. 530-549. Recuperado de: <http://www.mdpi.com/2073-4441/2/3/530/htm>
- Wong, N. H., Tan, A. Y. K., Tan, P. Y., Chiang, K., & Wong, N. C. (2010). "Acoustics evaluation of vertical greenery systems for building walls", *Building and Environment*, Vol. 45, No. 2, pp. 411-420. Recuperado de: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132309001632>
- Wu, H., Zhang, J., Hao, H., Guo, W., Hu, Z., Liang, S., & Fan, J. (2015). "A review on the sustainability of constructed wetlands for wastewater treatment: Design and operation" *Bioresource Technology*, Vol. 175, pp. 594-601. Recuperado de: <http://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.10.068>
- Wu, S., Kuschik, P., Brix, H., Vymazal, J., Dong, R., (2014). "Development of constructed wetlands in performance intensifications for wastewater treatment: a nitrogen and organic matter targeted review", *Water Research*. Vol. 57, pp. 40-55. Recuperado de: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043135414002103>
- Yuan, D., Ren, Q., Gao, S., Zhang, H., Yin, D., & Wang, L. (2004). "Purification efficiency of several wetland macrophytes on COD and nitrogen removal from domestic sewage", *Ying yong sheng tai xue bao= The journal of applied ecology*/2004, 15(12):2337-2341
- Zúñiga, M. A. G., Zurita, J. G., & Barrios, R. G. (2016). "Evaluación de un sistema de tratamiento doméstico para reuso de agua residual", *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 32(2), 199-211.
- Zurita, F., De Anda, J., & Belmont, M. A. (2009). "Treatment of domestic wastewater and production of commercial flowers in vertical and horizontal subsurface-flow constructed wetlands", *Ecological Engineering*, 35(5), 861-869.

Libros:

Gonzalez, J. F., de Miguel Beascoechea, E., de Miguel Muñoz, J., & Curt, M. D. (2009). *Manual de fitodepuración. Filtros de macrofitas en floatación. Proyecto LIFE: Nuevos filtros verdes de macrofitas en floatación para la cuenca mediterránea*. Recuperado de: <http://www.aguasresiduales.info/revista/libros/manual-de-fitodepuracion-filtro-de-macrofitas-en-flotacion>.

Hoffman, H., & Platzer, C. (2011). *Revisión técnica de humedales artificiales de flujo subsuperficial para el tratamiento de aguas grises y aguas domésticas*. Eschborn, Alemania, GIZ y ECOSAN. Recuperado de: <http://ecotec.unam.mx/Ecotec/wp-content/uploads/Revision-Tecnica-de-Humedales-Artificiales.pdf>

Kadlec, R. H., & Wallace, S. (2009). Treatment wetlands, second edition, Florida USA, CRC press. Recuperado de: http://www.sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/kadlec%20wallace%202009%20Treatment%20Wetlands%202nd%20Edition_0.pdf

Metcalf y Eddy, (2003). Waste engineering: treatment and reuse. 4th ed. McGraw-Hill, Nueva York. 1819 p.

Minke, G. & Peterssen, G. (2014). Muros y fachadas verdes, jardines verticales. Barcelona, España, Icaria

Stefanakis, A., Akrotos, C. S., & Tsihrintzis, V. A. (2014). Vertical flow constructed wetlands: eco-engineering systems for wastewater and sludge treatment, Oxford, Reino Unido, Elsevier Inc. Recuperado de: <http://www.sciencedirect.com/science/book/9780124046122>

Tesis:

Navarro Portilla, J. (2013). Los jardines verticales en la edificación, Trabajo final de máster en edificación, Universidad Politécnica de Valencia. Recuperado de: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/33814/tfm%20juan%20navarro.pdf?sequence=1>

Otellé, M. (2011). The Green Building Envelope: Vertical Greening, Tesis de Doctorado en Ingeniería Civil, Universidad Técnica de Delft, Países Bajos, Ámsterdam. Recuperado de: <http://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:1e38e393-ca5c-45af-a4fe-31496195b88d?collection=research>

Sakkas, P. (2012). Domestic greywater treatment through the integration of constructed wetlands Living Wall Systems (LWS), Tesis de Maestría en Arquitectura, Universidad Técnica de Delft, Países Bajos, Ámsterdam. Recuperado de: <http://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:76db9490-22d8-4739-a2b3-dcdc4def67c2/?collection=research>

Svete, L. (2012). Vegetated Greywater Treatment Walls: Design modifications for intermittent media filters, Tesis de Maestría, Department of Mathematical Science and Technology, Norwegian University of Life Sciences. Recuperado de: <https://brage.bibsys.no/xmlui/bitstream/handle/11250/188977/Svete2012.pdf?sequence=1>

Páginas web:

Ambientum, (2002), Nitrógeno en el Agua, Recuperado de: https://www.ambientum.com/revista/2002_05/NTRGNO2.asp

Calderón Sáenz, F. & Cevallos, F. (2001). Los Sustratos, Dr. Calderón Laboratorios Ltda. Recuperado de: http://www.drcalderonlabs.com/Publicaciones/Los_Sustratos.htm

Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción (CMIC), (2016). ¿Quiénes somos?. Recuperado de: <http://www.cmic.org/quienes-somos>

Ferrex, (2016), Materiales de Construcción, Recuperado de: <http://www.materialesdeconstruccion.com.mx/materiales-tezontle.php>

Hydro Environment (2016). ¿Qué es un sustrato?. Recuperado de: http://www.hydroenv.com.mx/catalogo/index.php?main_page=page&id=31



Infoagro (2016). Tipos de sustratos de cultivo, Recuperado de: http://www.infoagro.com/industria_auxiliar/tipo_sustratos2.htm

Masi, F., Rizzo, A., & Bresciani, R. (2015). Green architecture and water reuse: examples from different countries, Sustainable Sanitation and Water Management. Recuperado de: http://www.sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/MASI%20et%20al%202015%20Green%20Architecture.pdf

Ríos Araguez, J. (2013). Depuración de aguas residuales – 2/7: Características de las aguas residuales urbanas, Triplenlance, Recuperado de: <http://triplenlace.com/2013/05/17/sistemas-de-depuracion-de-aguas-residuales-26-caracteristicas-de-las-aguas-residuales-urbanas/>

Sustentabilidad para México (SUMe), (2016), Sobre SUMe,. Recuperado de: <http://sume.org.mx/>

Publicaciones de universidades:

Noyola, A., Morgan-Sagastume, J., & Guereca, L. (2013). Selección de Tecnologías Para el Tratamiento de Aguas Residuales Municipales, Guía de apoyo para ciudades pequeñas y medianas, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ingeniería, México. Recuperado de: http://www.pronatura-sur.org/web/docs/Tecnologia_Aguas_Residuales.pdf

Perc, M. N. (2014) Vertical constructed wetland for embedded grey water treatment, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad de Maribor, Eslovenia. Recuperado de: http://www.siscone.com.br/Uploads/CIB2014/Trabo1280000152520140528_00000.PDF

Martínez González, S., & Márquez Vázquez, M. (2014). Cuaderno de Apuntes: Fundamentos Teóricos para el Diseño de Humedales Artificiales, Facultad de Estudios Superiores Aragón, Estado de México.

Noticias:

Forbes, (2016). Canadevi prevé mayor demanda por vivienda de interés social. Recuperado de: <http://www.forbes.com.mx/category/economia-y-finanzas/>

Presentaciones:

Niño, Martha, (2015). Norma Mexicana Edificación Sustentable NMX-AA-164-SCFI-2013 Criterios y requerimientos ambientales mínimos (diapositiva), México: SEMARNAT, 46 diapositivas.

Otros:

De la Peña, M., Ducci, J., y Zamora, V. (2013). Tratamiento de aguas residuales en México, México D.F., Banco Interamericano de Desarrollo. Recuperado de: <http://idbdocs.iadb.org/wsdocs/getdocument.aspx?docnum=37783778>

World Health Organization – Regional Office for the Eastern Mediterranean (WHO- ROEM) (2006). Overview of greywater management: Health considerations. Recuperado de: <http://www.emro.who.int/ceha/pdf/Greywter%20English%202006>

Kezerashvili, R. Y., & Sapozhnikov, A. (2003). Magic Fountain, Recuperado de: <https://arxiv.org/ftp/physics/papers/0310/0310039.pdf>

ANEXOS





ANEXO 1- CONCNETRACIÓN DE DQO, NH₃-, NO₂- NO₃- y NT EN CADA UNO DE LOS HUMEDALES

| No. De Muestra | Demanda Química de Oxígeno (DQO) | | | | | | | | |
|----------------|----------------------------------|-----------------|--------------|-----------------|-----------------|--------------|-----------------|-----------------|--------------|
| | Humedal 1 | | | Humedal 2 | | | Humedal 3 | | |
| | Afluente (mg/l) | Efluente (mg/l) | Remoción (%) | Afluente (mg/l) | Efluente (mg/l) | Remoción (%) | Afluente (mg/l) | Efluente (mg/l) | Remoción (%) |
| 1 | 175 | | | 230 | | | 182 | | |
| 2 | 265 | | | 219 | | | 186 | | |
| 3 | 216 | | | 255 | | | 210 | | |
| 4 | 272 | 3 | 98.9% | 219 | 9 | 95.9% | 257 | 11 | 95.7% |
| 5 | 303 | 0 | 100.0% | 285 | 17 | 94.0% | 296 | 0 | 100.0% |
| 6 | 192 | 1 | 99.5% | 166 | 28 | 83.1% | 104 | 23 | 77.9% |
| 7 | 141 | 10 | 92.9% | 191 | 33 | 82.7% | 136 | 48 | 64.7% |
| 8 | 219 | 0 | 100.0% | 281 | 12 | 95.7% | 257 | 26 | 89.9% |
| 9 | 221 | 5 | 97.7% | 222 | 20 | 91.0% | 238 | 4 | 98.3% |
| 10 | 170 | 16 | 90.6% | 169 | 10 | 94.1% | 158 | 24 | 84.8% |
| 11 | 185 | 0 | 100.0% | 149 | 0 | 100.0% | 182 | 0 | 100.0% |
| 12 | 183 | 0 | 100.0% | 232 | 14 | 94.0% | 229 | 33 | 85.6% |
| 13 | 249 | 4 | 98.4% | 282 | 23 | 91.8% | 251 | 35 | 86.1% |
| | | Promedio | 97.80% | | Promedio | 92.24% | | Promedio | 88.30% |

| No. De Muestra | Amoníaco (NH ₃ -) | | | | | | | | |
|----------------|------------------------------|-----------------|--------------|-----------------|-----------------|--------------|-----------------|-----------------|--------------|
| | Humedal 1 | | | Humedal 2 | | | Humedal 3 | | |
| | Afluente (mg/l) | Efluente (mg/l) | Remoción (%) | Afluente (mg/l) | Efluente (mg/l) | Remoción (%) | Afluente (mg/l) | Efluente (mg/l) | Remoción (%) |
| 1 | 6.77 | 3.500 | 48.3% | 10.04 | 2.070 | 79.4% | 6.70 | 1.300 | 80.6% |
| 2 | 8.91 | 2.840 | 68.1% | 8.33 | 2.290 | 72.5% | 8.63 | 1.380 | 84.0% |
| 3 | 9.41 | 3.500 | 62.8% | 12.20 | 3.500 | 71.3% | 9.26 | 2.420 | 73.9% |
| 4 | 11.17 | 2.340 | 79.1% | 11.00 | 3.500 | 68.2% | 9.58 | 3.160 | 67.0% |
| 5 | 5.25 | 0.755 | 85.6% | 5.81 | 0.849 | 85.4% | 3.59 | 0.089 | 97.5% |
| 6 | 2.95 | 0.201 | 93.2% | 6.28 | 0.565 | 91.0% | 3.71 | 0.424 | 88.6% |
| 7 | 4.49 | 0.155 | 96.5% | 8.66 | 1.030 | 88.1% | 6.30 | 0.244 | 96.1% |
| 8 | 7.67 | 0.107 | 98.6% | 8.27 | 0.996 | 88.0% | 7.36 | 1.890 | 74.3% |
| 9 | 11.40 | 0.063 | 99.4% | 13.40 | 0.114 | 99.1% | 11.2 | 1.220 | 89.1% |
| | | Promedio | 81.30% | | Promedio | 82.55% | | Promedio | 83.46% |

| No. De Muestra | Nitrito (NO ₂ -) | | | | | | | | |
|----------------|-----------------------------|-----------------|--------------|-----------------|-----------------|--------------|-----------------|-----------------|--------------|
| | Humedal 1 | | | Humedal 2 | | | Humedal 3 | | |
| | Afluente (mg/l) | Efluente (mg/l) | Remoción (%) | Afluente (mg/l) | Efluente (mg/l) | Remoción (%) | Afluente (mg/l) | Efluente (mg/l) | Remoción (%) |
| 1 | 0.039 | 0.006 | 84.6% | 0.050 | 0.015 | 70.0% | 0.055 | 0.014 | 74.5% |
| 2 | 0.039 | 0.006 | 84.6% | 0.051 | 0.015 | 70.6% | 0.031 | 0.013 | 58.1% |
| 3 | 0.042 | 0.006 | 85.7% | 0.045 | 0.015 | 66.7% | 0.061 | 0.012 | 80.3% |
| 4 | 0.056 | 0.006 | 89.3% | 0.039 | 0.015 | 61.5% | 0.028 | 0.014 | 50.0% |
| 5 | 0.034 | 0.011 | 67.6% | 0.025 | 0.011 | 56.0% | 0.043 | 0.015 | 65.1% |
| 6 | 0.035 | 0.009 | 74.3% | 0.041 | 0.004 | 90.2% | 0.047 | 0.015 | 68.1% |
| 7 | 0.055 | 0.007 | 87.3% | 0.085 | 0.010 | 88.2% | 0.092 | 0.016 | 82.6% |
| 8 | 0.045 | 0.005 | 88.9% | 0.058 | 0.012 | 79.3% | 0.061 | 0.014 | 77.0% |
| 9 | 0.074 | 0.006 | 91.9% | 0.080 | 0.016 | 80.0% | 0.075 | 0.006 | 92.0% |
| | | Promedio | 83.80% | | Promedio | 73.62% | | Promedio | 71.98% |

| No. De Muestra | Nitrate (NO ₃ -) | | | | | | | | |
|----------------|-----------------------------|-----------------|--------------|-----------------|-----------------|--------------|-----------------|-----------------|--------------|
| | Humedal 1 | | | Humedal 2 | | | Humedal 3 | | |
| | Afluente (mg/l) | Efluente (mg/l) | Remoción (%) | Afluente (mg/l) | Efluente (mg/l) | Remoción (%) | Afluente (mg/l) | Efluente (mg/l) | Remoción (%) |
| 1 | 0.183 | 0.134 | 26.8% | 0.199 | 0.115 | 42.2% | 0.178 | 0.132 | 25.8% |
| 2 | 0.151 | 0.134 | 11.3% | 0.138 | 0.115 | 16.7% | 0.294 | 0.132 | 55.1% |
| 3 | 0.191 | 0.134 | 29.8% | 0.152 | 0.115 | 24.3% | 0.111 | 0.132 | -18.9% |
| 4 | 0.101 | 0.134 | -32.7% | 0.155 | 0.115 | 25.8% | 0.181 | 0.132 | 27.1% |
| 5 | 0.127 | 0.134 | -5.5% | 0.150 | 0.115 | 23.3% | 0.108 | 0.132 | -22.2% |
| 6 | 0.103 | 0.148 | -43.7% | 0.086 | 0.117 | -36.0% | 0.042 | 0.096 | -128.6% |
| 7 | 0.065 | 0.150 | -130.8% | 0.114 | 0.118 | -3.5% | 0.137 | 0.120 | 12.4% |
| 8 | 0.104 | 0.174 | -67.3% | 0.102 | 0.100 | 2.0% | 0.114 | 0.110 | 3.5% |
| 9 | 0.137 | 0.180 | -31.4% | 0.11 | 0.066 | 39.4% | 0.092 | 0.140 | -52.2% |
| | | Promedio | -27.05% | | Promedio | 14.91% | | Promedio | -10.88% |

| No. De Muestra | Nitrógeno Total (NT) | | | | | | | | |
|----------------|----------------------|-----------------|--------------|-----------------|-----------------|--------------|-----------------|-----------------|--------------|
| | Humedal 1 | | | Humedal 2 | | | Humedal 3 | | |
| | Afluente (mg/l) | Efluente (mg/l) | Remoción (%) | Afluente (mg/l) | Efluente (mg/l) | Remoción (%) | Afluente (mg/l) | Efluente (mg/l) | Remoción (%) |
| 1 | 6.992 | 3.640 | 47.9% | 10.289 | 2.200 | 78.6% | 6.933 | 1.446 | 79.1% |
| 2 | 9.100 | 2.980 | 67.3% | 8.519 | 2.420 | 71.6% | 8.955 | 1.525 | 83.0% |
| 3 | 9.643 | 3.640 | 62.3% | 12.397 | 3.630 | 70.7% | 9.432 | 2.564 | 72.8% |
| 4 | 11.327 | 2.480 | 78.1% | 11.194 | 3.630 | 67.6% | 9.789 | 3.306 | 66.2% |
| 5 | 5.411 | 0.900 | 83.4% | 5.985 | 0.975 | 83.7% | 3.741 | 0.236 | 93.7% |
| 6 | 3.088 | 0.358 | 88.4% | 6.407 | 0.686 | 89.3% | 3.799 | 0.535 | 85.9% |
| 7 | 4.610 | 0.312 | 93.2% | 8.859 | 1.158 | 86.9% | 6.529 | 0.380 | 94.2% |
| 8 | 7.819 | 0.286 | 96.3% | 8.430 | 1.108 | 86.9% | 7.535 | 2.014 | 73.3% |
| 9 | 11.611 | 0.249 | 97.9% | 13.589 | 0.196 | 98.6% | 11.367 | 1.366 | 88.0% |
| | | Promedio | 77.11% | | Promedio | 79.41% | | Promedio | 81.03% |

ANEXO 2- CONCENTRACIONES DE ST,STF, STV EN CADA HUMEDAL

| No. de humedal | No. de muestra | Pesos constantes de cápsulas | | | G | G1 | G2 | V | — | ST | STV | Proporción % | STF | Proporción % | |
|----------------|----------------|------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|----|---------|------|--------------|--------|--------------|--------|
| | | 1 | 2 | 3 | | | | | | | | | | | |
| Afluente | H1 | 1 | 24.201 | 24.201 | | 24.201 | 24.219 | 24.215 | 15 | 1153.33 | 100% | 253.33 | 21.97% | 900.00 | 78.03% |
| | | 2 | 23.756 | 23.757 | | 23.757 | 23.776 | 23.771 | 15 | 1273.33 | 100% | 320.00 | 25.13% | 953.33 | 74.87% |
| | | 3 | 24.330 | 24.333 | 24.330 | 24.330 | 24.349 | 24.345 | 15 | 1253.33 | 100% | 280.00 | 22.34% | 973.33 | 77.66% |
| | | 4 | 24.329 | 24.329 | | 24.329 | 24.347 | 24.343 | 15 | 1246.67 | 100% | 306.67 | 24.60% | 940.00 | 75.40% |
| | | 5 | 36.636 | 36.636 | | 36.636 | 36.655 | 36.650 | 15 | 1253.33 | 100% | 320.00 | 25.53% | 933.33 | 74.47% |
| | H2 | 1 | 24.328 | 24.328 | | 24.328 | 24.344 | 24.342 | 15 | 1053.33 | 100% | 146.67 | 13.92% | 906.67 | 86.08% |
| | | 2 | 36.636 | 36.636 | | 36.636 | 36.656 | 36.651 | 15 | 1300.00 | 100% | 346.67 | 26.67% | 953.33 | 73.33% |
| | | 3 | 24.643 | 24.642 | | 24.642 | 24.661 | 24.656 | 15 | 1266.67 | 100% | 340.00 | 26.84% | 926.67 | 73.16% |
| | | 4 | 23.755 | 23.756 | | 23.756 | 23.775 | 23.770 | 15 | 1293.33 | 100% | 306.67 | 23.71% | 986.67 | 76.29% |
| | | 5 | 24.329 | 24.329 | | 24.329 | 24.348 | 24.343 | 15 | 1273.33 | 100% | 293.33 | 23.04% | 980.00 | 76.96% |
| | H3 | 1 | 25.605 | 25.605 | 25.605 | 25.605 | 25.623 | 25.619 | 15 | 1186.67 | 100% | 266.67 | 22.47% | 920.00 | 77.53% |
| | | 2 | 32.934 | 32.934 | 32.934 | 32.934 | 32.953 | 32.949 | 15 | 1286.67 | 100% | 326.67 | 25.39% | 960.00 | 74.61% |
| | | 3 | 25.606 | 25.605 | | 25.605 | 25.624 | 25.620 | 15 | 1266.67 | 100% | 300.00 | 23.68% | 966.67 | 76.32% |
| | | 4 | 23.657 | 23.657 | | 23.657 | 23.675 | 23.671 | 15 | 1240.00 | 100% | 313.33 | 25.27% | 926.67 | 74.73% |
| | | 5 | 25.606 | 24.606 | | 24.606 | 24.625 | 24.621 | 15 | 1266.67 | 100% | 300.00 | 23.68% | 966.67 | 76.32% |
| Efluente | H1 | 1 | 23.656 | 23.655 | | 23.655 | 23.672 | 23.668 | 15 | 1113.33 | 100% | 266.67 | 23.95% | 846.67 | 76.05% |
| | | 2 | 24.329 | 24.329 | | 24.329 | 24.349 | 24.344 | 15 | 1333.33 | 100% | 353.33 | 26.50% | 980.00 | 73.50% |
| | | 3 | 25.605 | 25.605 | | 25.605 | 25.623 | 25.620 | 15 | 1200.00 | 100% | 240.00 | 20.00% | 960.00 | 80.00% |
| | | 4 | 24.203 | 24.203 | | 24.203 | 24.222 | 24.217 | 15 | 1273.33 | 100% | 333.33 | 26.18% | 940.00 | 73.82% |
| | | 5 | 32.935 | 32.935 | 32.935 | 32.935 | 32.954 | 32.949 | 15 | 1273.33 | 100% | 366.67 | 28.80% | 906.67 | 71.20% |
| | H2 | 1 | 24.328 | 24.328 | 24.328 | 24.328 | 24.346 | 24.342 | 15 | 1173.33 | 100% | 233.33 | 19.89% | 940.00 | 80.11% |
| | | 2 | 32.934 | 32.934 | | 32.934 | 32.954 | 32.949 | 15 | 1313.33 | 100% | 326.67 | 24.87% | 986.67 | 75.13% |
| | | 3 | 24.643 | 24.643 | | 24.643 | 24.662 | 24.658 | 15 | 1293.33 | 100% | 260.00 | 20.10% | 1033.33 | 79.90% |
| | | 4 | 23.656 | 23.656 | | 23.656 | 23.675 | 23.671 | 15 | 1240.00 | 100% | 226.67 | 18.28% | 1013.33 | 81.72% |
| | | 5 | 36.637 | 36.635 | 36.637 | 36.637 | 36.653 | 36.650 | 15 | 1073.33 | 100% | 226.67 | 21.12% | 846.67 | 78.88% |
| | H3 | 1 | 25.605 | 25.605 | 25.605 | 25.605 | 25.622 | 25.619 | 15 | 1126.67 | 100% | 213.33 | 18.93% | 913.33 | 81.07% |
| | | 2 | 24.203 | 24.202 | | 24.202 | 24.221 | 24.217 | 15 | 1246.67 | 100% | 253.33 | 20.32% | 993.33 | 79.68% |
| | | 3 | 32.934 | 32.934 | | 32.934 | 32.955 | 32.949 | 15 | 1340.00 | 100% | 393.33 | 29.35% | 946.67 | 70.65% |
| | | 4 | 24.643 | 24.643 | | 24.643 | 24.662 | 24.659 | 15 | 1300.00 | 100% | 206.67 | 15.90% | 1093.33 | 84.10% |
| | | 5 | 25.605 | 25.606 | 25.606 | 25.606 | 25.629 | 25.622 | 15 | 1480.00 | 100% | 406.67 | 27.48% | 1073.33 | 72.52% |

Fórmulas empleadas

Para el contenido de Sólidos Totales:

$$ST = (GI - G) * 1000 / V$$

en donde:

ST= Son los sólidos totales (mg/l)

G= Es la masa de la cápsula vacía (g)

G1= Es la masa después de evaporación (g)

V= Es el volumen muestra (ml)

Para el cálculo del contenido de Sólidos Totales Volátiles:

$$STV = (GI - G2) * 1000 / V$$

en donde:

STV= Son los sólidos totales volátiles (mg/l)

G1= Es la masa después de evaporación (g)

G2= Es la masa después de calcinación (g)

V= Es el volumen muestra (ml)

Para el contenido de Sólidos Totales Fijos:

$$STF = ST - STV$$

en donde:

ST= Son los sólidos totales (mg/l)

STV= Son los sólidos totales volátiles (mg/l)

| Remoción | | | | | |
|-----------|---------|----------|---------|----------|---------|
| ST | % | STV | % | STF | % |
| Humedal 1 | | | | | |
| 40.00 | 3.47% | -13.33 | -5.26% | 53.33 | 5.93% |
| -60.00 | -4.71% | -33.33 | -10.42% | -26.67 | -2.80% |
| 53.33 | 4.26% | 40.00 | 14.29% | 13.33 | 1.37% |
| -26.67 | -2.14% | -26.67 | -8.70% | 0.00 | 0.00% |
| -20.00 | -1.60% | -46.67 | -14.58% | 26.67 | 2.86% |
| Promedio | -0.14% | Promedio | -4.93% | Promedio | 1.47% |
| Humedal 2 | | | | | |
| -120.00 | -11.39% | -86.67 | -59.09% | -33.33 | -3.68% |
| -13.33 | -1.03% | 20.00 | 5.77% | -33.33 | -3.50% |
| -26.67 | -2.11% | 80.00 | 23.53% | -106.67 | -11.51% |
| 53.33 | 4.12% | 80.00 | 26.09% | -26.67 | -2.70% |
| 200.00 | 15.71% | 66.67 | 22.73% | 133.33 | 13.61% |
| Promedio | 1.06% | Promedio | 3.80% | Promedio | -1.56% |
| Humedal 3 | | | | | |
| 60.00 | 5.06% | 53.33 | 20.00% | 6.67 | 0.72% |
| 40.00 | 3.11% | 73.33 | 22.45% | -33.33 | -3.47% |
| -73.33 | -5.79% | -93.33 | -31.11% | 20.00 | 2.07% |
| -60.00 | -4.84% | 106.67 | 34.04% | -166.67 | -17.99% |
| -213.33 | -16.84% | -106.67 | -35.56% | -106.67 | -11.03% |
| Promedio | -3.86% | Promedio | 1.96% | Promedio | -5.94% |

ANEXO 3- DATOS OBTENIDOS DEL ANÁLISIS DE TURBIDEZ Y pH EN CADA HUMEDAL

| No.De Muestra | Turbidez (UTN) | | | | | | | | |
|---------------|----------------|----------|--------------|-----------|----------|--------------|-----------|----------|--------------|
| | Humedal 1 | | | Humedal 2 | | | Humedal 3 | | |
| | Afluente | Efluente | Remoción (%) | Afluente | Efluente | Remoción (%) | Efluente | Salida | Remoción (%) |
| 1 | 24.4 | 1.9 | 92.2% | 32 | 1.6 | 95.0% | 33 | 2.6 | 92.1% |
| 2 | 24.8 | 1.3 | 94.8% | 17.2 | 2.2 | 87.2% | 31.4 | 3 | 90.4% |
| 3 | 31 | 1.5 | 95.2% | 36.3 | 2.9 | 92.0% | 32.8 | 4.2 | 87.2% |
| 4 | 37.4 | 1.4 | 96.3% | 57.4 | 2.5 | 95.6% | 49.5 | 2.8 | 94.3% |
| 5 | 59.3 | 1.3 | 97.8% | 66.7 | 42.5 | 36.3% | 63.8 | 27 | 57.7% |
| | | Promedio | 95.2% | | Promedio | 81.2% | | Promedio | 84.4% |

| No. De Muestra | Potencial de Hidrogeniones (pH) | | | | | |
|----------------|---------------------------------|----------|-----------|----------|-----------|----------|
| | Humedal 1 | | Humedal 2 | | Humedal 3 | |
| | Afluente | Efluente | Afluente | Efluente | Afluente | Efluente |
| 1 | 6.64 | 6.94 | 6.60 | 6.78 | 6.65 | 6.98 |
| 2 | 6.63 | 6.79 | 6.63 | 7.05 | 6.64 | 7.17 |
| 3 | 6.74 | 6.89 | 6.72 | 7.01 | 6.77 | 7.41 |
| 4 | 6.73 | 7.10 | 6.7 | 6.97 | 6.69 | 7.11 |
| 5 | 6.66 | 6.86 | 6.93 | 6.95 | 6.68 | 7.15 |
| 6 | 6.72 | 7.89 | 6.73 | 7.93 | 6.86 | 7.95 |
| 7 | 7.04 | 7.55 | 6.99 | 7.39 | 6.94 | 7.33 |
| 8 | 6.92 | 7.11 | 6.98 | 7.42 | 7.02 | 7.33 |
| 9 | 6.92 | 7.15 | 7.06 | 7.22 | 7.04 | 7.27 |
| Promedio | 6.78 | 7.14 | 6.82 | 7.19 | 6.81 | 7.30 |

ANEXO 4- PORCENTAJE DE POROSIDAD Y HUMEDAD DE LOS SUSTRATOS, ASÍ COMO PESOS TOTALES.

| Cálculo para el porcentaje de porosidad y de humedad de cada sustrato | | | |
|---|--------|--------|--------|
| | H1 | H2 | H3 |
| m | 0.43 | 0.35 | 0.75 |
| d | 0.12 | 0.13 | 0.52 |
| % | 72.00% | 63.41% | 30.26% |
| Vv | 83.50 | 59.25 | 61.00 |
| Vt | 100 | 100 | 100 |
| n | 83.50% | 59.25% | 61.00% |

Formulas empleadas:

Para el cálculo del porcentaje de humedad

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

en donde:

% = Es el porcentaje humedad

m = Es la masa del sustrato húmedo (g/ml)

d = Es la masa de sustrato seco (g/ml)

Para el cálculo del porcentaje de porosidad

$$n = (V_v / V_t) * 100$$

en donde:

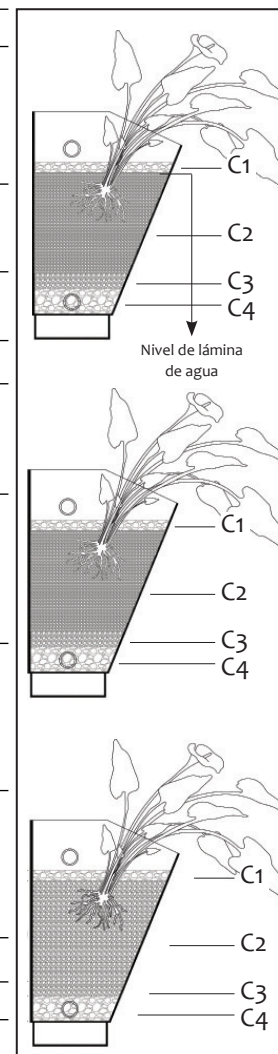
n = Es el porcentaje de porosidad

Vv= Es la cantidad de agua ingresada (ml)
















Vt= Es el volumen total de sustrato (ml)

Cálculo del peso de cada módulo de acuerdo a las capas empleadas

| Condiciones de peso | Vermiculita (S1) | Perlita (S2) | Tepojal (S3) | | | | |
|---|------------------|-------------------|--------------|-------------------|----------|-------------------|----------|
| Peso seco (g/cm³) | 0.12 | 0.13 | 0.52 | | | | |
| Peso saturado (g/cm³)* | 0.81 | 0.74 | 1.01 | | | | |
| *Indica el peso del sustrato en condiciones saturadas de agua | | | | | | | |
| | Capa | Sustrato empleado | H1 | Sustrato empleado | H2 | Sustrato empleado | H3 |
| Peso seco | C1 | S3 | 0.52 | S3 | 0.52 | S3 | 0.52 |
| | C2 | S1 | 0.81 | S2 | 0.74 | S3 | 1.01 |
| | C3 | S3 | 1.01 | S3 | 1.01 | S3 | 1.01 |
| | C4 | S3 | 1.01 | S3 | 1.01 | S3 | 1.01 |
| Peso saturado | C1 | S3 | 100 | S3 | 100 | S3 | 100 |
| | C2 | S1 | 449 | S2 | 449 | S3 | 449 |
| | C3 | S3 | 53 | S3 | 53 | S3 | 53 |
| | C4 | S3 | 81 | S3 | 81 | S3 | 81 |
| Area (cm²) | C1 | S3 | 6000 | S3 | 6000 | S3 | 6000 |
| | C2 | S1 | 26940 | S2 | 26940 | S3 | 26940 |
| | C3 | S3 | 3180 | S3 | 3180 | S3 | 3180 |
| | C4 | S3 | 4860 | S3 | 4860 | S3 | 4860 |
| Volumen (cm³) | C1 | S3 | 3120.00 | S3 | 3120.00 | S3 | 3120.00 |
| | C2 | S1 | 21858.44 | S2 | 19885.09 | S3 | 27320.53 |
| | C3 | S3 | 3224.92 | S3 | 3224.92 | S3 | 3224.92 |
| | C4 | S3 | 4908.60 | S3 | 4908.60 | S3 | 4908.60 |
| Peso (g) | C1 | S3 | 4908.60 | S3 | 4908.60 | S3 | 4908.60 |
| Peso propio del módulo (g) | | | 4000 | | 4000 | | 4000 |
| Peso Total (g) | | | 37111.96 | | 35138.61 | | 42574.05 |
| Peso Total (kg) | | | 37.11 | | 35.14 | | 42.57 |



ANEXO 5- REPORTE FOTOGRÁFICO DE CRECIMIENTO DE PLANTAS EN CADA HUMEDAL

| Semana | H1 | H2 | H3 |
|----------|---|---|---|
| Semana 1 |  |  |  |
| Semana 2 |  |  |  |
| Semana 4 |  |  |  |
| Semana 6 |  |  |  |
| Semana 7 |  |  |  |

| Semana | H1 | H2 | H3 |
|-----------|----|----|----|
| Semana 9 | | | |
| Semana 10 | | | |
| Semana 11 | | | |
| Semana 12 | | | |
| Semana 16 | | | |



| Semana | H1 | | H2 | | H3 |
|-----------|---|--|---|--|---|
| Semana 16 |  | |  | |  |
| Semana 17 |  | |  | |  |
| Semana 18 |  | |  | |  |
| Semana 20 |  | |  | |  |

ANEXO 6- DATOS DE TEMPERATURAS INTERNAS POR CADA HUMEDAL

| Fecha | H1 | | | H2 | | | H3 | | |
|------------|----------|--------------------------|---------------------------|----------|--------------------------|---------------------------|------------|--------------------------|---------------------------|
| | Hora | Temperatura Interna (°C) | Temperatura Ambiente (°C) | Hora | Temperatura Interna (°C) | Temperatura Ambiente (°C) | Hora | Temperatura Interna (°C) | Temperatura Ambiente (°C) |
| 11/3/2016 | 10:55 AM | 17 | 19 | 10:51 AM | 17 | 19 | 10:49 AM | 15 | 19 |
| 11/4/2016 | 11:02 AM | 16 | 18 | 11:05 AM | 17 | 18 | 11:09 a.m. | 16 | 18 |
| 11/7/2016 | 10:36 AM | 18 | 20 | 10:39 AM | 17 | 20 | 10:45 AM | 16 | 20 |
| 11/10/2016 | 10:40 AM | 12 | 14 | 10:43 AM | 13 | 14 | 10:47 AM | 13 | 14 |
| 11/17/2016 | 10:28 AM | 13 | 16 | 10:30 AM | 14 | 16 | 10:36 AM | 14 | 16 |
| 11/22/2016 | 10:51 AM | 14 | 16 | 10:54 AM | 13 | 16 | 10:56 AM | 13 | 16 |
| 11/23/2016 | 10:47 AM | 14 | 16 | 10:50 AM | 14 | 16 | 10:57 AM | 13 | 16 |
| 11/28/2016 | 11:30 AM | 18 | 20 | 11:37 AM | 16 | 20 | 11:44 AM | 16 | 20 |
| 11/29/2016 | 11:05 AM | 19 | 21 | 11:10 AM | 17 | 21 | 11:15 AM | 16 | 21 |
| 12/1/2016 | 10:09 AM | 16 | 18 | 10:17 AM | 16 | 18 | 10:31 AM | 16 | 18 |
| 12/5/2016 | 9:56 AM | 17 | 19 | 10:00 AM | 17 | 19 | 10:09 AM | 16 | 19 |
| 12/6/2016 | 10:16 AM | 15 | 18 | 10:12 AM | 15 | 18 | 10:06 AM | 14 | 18 |
| 12/8/2016 | 11:29 AM | 16 | 21 | 11:26 AM | 16 | 21 | 11:21 AM | 15 | 21 |
| 12/13/2016 | 11:45 AM | 17 | 21 | 11:57 AM | 18 | 21 | 12:03 PM | 16 | 21 |
| 1/13/2017 | 11:55 AM | 17 | 19 | 12:04 PM | 16 | 19 | 12:07 PM | 16 | 19 |
| 1/17/2017 | 11:07 AM | 16 | 19 | 11:13 AM | 15 | 19 | 11:17 AM | 16 | 19 |
| 1/18/2017 | 10:12 AM | 14 | 16 | 10:14 AM | 14 | 16 | 10:18 AM | 14 | 16 |
| 1/20/2017 | 11:40 AM | 17 | 21 | 11:45 AM | 18 | 21 | 11:47 AM | 17 | 21 |
| 1/23/2017 | 11:49 AM | 16 | 19 | 11:52 AM | 16 | 19 | 11:54 AM | 15 | 19 |
| | Promedio | 15.89 | 18.47 | Promedio | 15.74 | 18.47 | Promedio | 15.11 | 18.47 |

| | | | | | | | | | |
|------------|------------|-------|-------|------------|-------|-------|----------|-------|-------|
| 10/31/2016 | 12:44 PM | 18 | 20 | 12:48 PM | 17 | 20 | 12:51 PM | 16 | 20 |
| 11/8/2016 | 01:42 PM | 17 | 19 | 01:47 PM | 16 | 19 | 1:50 AM | 18 | 19 |
| 11/24/2016 | 12:12 p.m. | 16 | 17 | 12:21 p.m. | 17 | 17 | 12:26 PM | 17 | 17 |
| 11/30/2016 | 12:25 PM | 21 | 23 | 12:29 PM | 20 | 23 | 12:33 PM | 20 | 23 |
| 12/15/2016 | 12:03 PM | 17 | 19 | 12:06 PM | 18 | 19 | 12:10 PM | 17 | 19 |
| 1/12/2017 | 01:07 PM | 19 | 22 | 01:01 PM | 19 | 22 | 01:16 PM | 19 | 22 |
| 1/19/2017 | 12:58 PM | 18 | 23 | 01:00 PM | 20 | 23 | 01:02 PM | 21 | 23 |
| 1/24/2017 | 12:44 PM | 19 | 23 | 12:46 PM | 20 | 23 | 12:48 PM | 20 | 23 |
| 1/24/2017 | 12:44 PM | 19 | 23 | 12:46 PM | 20 | 23 | 12:48 PM | 20 | 23 |
| 1/26/2017 | 12:50 PM | 20 | 23 | 12:53 PM | 21 | 23 | 01:57 PM | 20 | 23 |
| | Promedio | 18.00 | 20.00 | Promedio | 17.83 | 20.00 | Promedio | 17.83 | 20.00 |
| 11/11/2016 | 03:21 PM | 16 | 18 | 03:36 PM | 15 | 18 | 03:36 PM | 16 | 18 |
| 11/14/2016 | 03:38 PM | 20 | 22 | 03:40 PM | 20 | 22 | 03:45 PM | 21 | 22 |
| 11/15/2016 | 02:37 PM | 21 | 20 | 02:32 PM | 20 | 20 | 02:40 PM | 21 | 20 |
| 11/25/2016 | 02:15 PM | 19 | 19 | 02:22 PM | 18 | 19 | 02:28 PM | 18 | 19 |
| 12/2/2016 | 4:40 p.m. | 20 | 22 | 04:45 PM | 20 | 22 | 04:48 PM | 19 | 22 |
| 12/7/2016 | 02:38 PM | 21 | 25 | 02:51 PM | 22 | 25 | 02:56 PM | 23 | 25 |
| 12/9/2016 | 03:30 PM | 20 | 21 | 03:32 PM | 20 | 21 | 03:34 PM | 21 | 21 |
| 1/11/2017 | 03:40 PM | 20 | 23 | 03:43 PM | 21 | 23 | 03:46 PM | 21 | 23 |
| 1/25/2017 | 04:35 PM | 21 | 23 | 04:38 PM | 21 | 23 | 04:39 PM | 21 | 23 |
| | Promedio | 20.29 | 22.80 | Promedio | 20.29 | 22.80 | Promedio | 20.57 | 22.80 |

ANEXO 7- ASOLEAMIENTO

9:00 h



10.00 h



11:00 h



12:00 h



13:00 h



ANEXO 8- CONCENTRACIÓN DE DQO, NH₃⁻, NO₂⁻, NO₃⁻ y NT EN EL VERDEM

| No. De Muestra | Demanda Química de Oxígeno (DQO) | | | Amoníaco (NH ₃ ⁻) | | | Nitrito (NO ₂ ⁻) | | |
|----------------|----------------------------------|------------------|--------------|--|------------------|--------------|---|------------------|--------------|
| | Afluyente (mg/l) | Efluyente (mg/l) | Remoción (%) | Afluyente (mg/l) | Efluyente (mg/l) | Remoción (%) | Afluyente (mg/l) | Efluyente (mg/l) | Remoción (%) |
| 1 | 210 | 6 | 97.1% | 15.70 | 1.06 | 93.2% | 0.081 | 0.089 | -9.9% |
| 2 | 178 | 2 | 98.9% | 12.50 | 2.22 | 82.2% | 0.091 | 0.014 | 84.6% |
| 3 | 235 | 0 | 100.0% | 19.60 | 0.727 | 96.3% | 0.081 | 0.028 | 65.4% |
| 4 | 40 | 0 | 100.0% | 19.44 | 0.740 | 96.2% | 0.085 | 0.008 | 90.6% |
| 5 | 46 | 0 | 100.0% | 13.30 | 1.540 | 88.4% | 0.004 | 0.009 | -125.0% |
| 6 | 49 | 1 | 98.0% | 24.50 | 1.330 | 94.6% | 0.020 | 0.003 | 85.0% |
| 7 | 103 | 2 | 98.1% | 6.24 | 2.800 | 55.1% | 0.020 | 0.044 | -120.0% |
| 8 | 122 | 0 | 100.0% | 18.60 | 0.507 | 97.3% | 0.045 | 0.016 | 64.4% |
| 9 | 128 | 0 | 100.0% | 27.40 | 0.850 | 96.9% | 0.033 | 0.049 | -48.5% |
| 10 | 243 | 3 | 98.8% | 30.80 | 3.070 | 90.0% | 0.041 | 0.188 | -358.5% |
| 11 | 287 | 7 | 97.6% | 8.79 | 0.599 | 93.2% | 0.058 | 0.007 | 87.9% |
| 12 | 1650 | 78 | 95.3% | 6.06 | 2.670 | 55.9% | 0.744 | 0.222 | 70.2% |
| 13 | 1154 | 99 | 91.4% | 3.04 | 2.120 | 30.3% | 0.246 | 0.048 | 80.5% |
| 14 | 1124 | 165 | 85.3% | 1.44 | 0.314 | 78.2% | 0.136 | 0.075 | 44.9% |
| | | Promedio | 97.17% | | Promedio | 81.99% | | Promedio | 0.83% |

| No. De Muestra | Nitrate (NO ₃ ⁻) | | | Nitrogeno Total (NT) | | |
|----------------|---|------------------|--------------|----------------------|------------------|--------------|
| | Afluyente (mg/l) | Efluyente (mg/l) | Remoción (%) | Afluyente (mg/l) | Efluyente (mg/l) | Remoción (%) |
| 1 | 0.132 | 0.149 | -12.9% | 15.91 | 1.30 | 91.8% |
| 2 | 0.112 | 0.090 | 19.6% | 12.70 | 2.32 | 81.7% |
| 3 | 0.183 | 0.144 | 21.3% | 19.86 | 0.90 | 95.5% |
| 4 | 0.141 | 0.083 | 41.1% | 19.67 | 0.83 | 95.8% |
| 5 | 0.135 | 0.052 | 61.5% | 13.44 | 1.60 | 88.1% |
| 6 | 0.186 | 0.130 | 30.1% | 24.71 | 1.46 | 94.1% |
| 7 | 0.117 | 0.348 | -197.4% | 6.38 | 3.19 | 49.9% |
| 8 | 0.919 | 0.149 | 83.8% | 19.56 | 0.67 | 96.6% |
| 9 | 0.153 | 0.205 | -34.0% | 27.59 | 1.10 | 96.0% |
| 10 | 0.240 | 0.190 | 20.8% | 31.08 | 3.45 | 88.9% |
| 11 | 0.156 | 0.084 | 46.2% | 9.00 | 0.69 | 92.3% |
| 12 | 4.710 | 2.280 | 51.6% | 11.51 | 5.17 | 55.1% |
| 13 | 1.550 | 0.520 | 66.5% | 4.84 | 2.69 | 44.4% |
| 14 | 0.738 | 1.340 | -81.6% | 2.31 | 1.73 | 25.3% |
| | | Promedio | 8.33% | | Promedio | 78.25% |

ANEXO 9- CONCENTRACIÓN DE SST, SSF, SSV EN EL VERDEM

| No. de muestra | Pesos constantes de cápsulas | | | | | G | G1 | G2 | V | Afluente | | | | | |
|----------------|------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|----------|------|---------|----------|---------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | | | | | SST | SSV | Prop. % | SSF | Prop. % | |
| 3 | 18.666 | 18.666 | 18.666 | | | 18.666 | 18.667 | 18.666 | 0.015 | 46.67 | 100% | 46.67 | 100.00% | 0.00 | 0.00% |
| 4 | 16.543 | 16.543 | 16.543 | | | 16.543 | 16.543 | 16.543 | 0.015 | 60.00 | 100% | 53.33 | 88.89% | 6.67 | 11.11% |
| 5 | 23.694 | 23.694 | | | | 23.694 | 23.696 | 23.695 | 0.015 | 93.33 | 100% | 66.67 | 71.43% | 26.67 | 28.57% |
| 6 | 23.796 | 23.795 | 23.795 | | | 23.795 | 23.796 | 23.796 | 0.015 | 20.00 | 100% | 6.67 | 33.33% | 13.33 | 66.67% |
| 7 | 22.776 | 22.777 | 22.776 | 22.777 | 22.777 | 22.777 | 22.778 | 22.777 | 0.015 | 73.33 | 100% | 73.33 | 100.00% | 0.00 | 0.00% |
| 8 | 23.697 | 23.696 | 23.696 | 23.696 | 23.696 | 23.696 | 23.698 | 23.696 | 0.015 | 86.67 | 100% | 80.00 | 92.31% | 6.67 | 7.69% |
| 9 | 23.491 | 23.491 | 23.491 | 23.491 | | 23.491 | 23.492 | 23.491 | 0.015 | 46.67 | 100% | 46.67 | 100.00% | 0.00 | 0.00% |
| 10 | 23.491 | 23.491 | 23.491 | | | 23.491 | 23.492 | 23.491 | 0.015 | 40.00 | 100% | 40.00 | 100.00% | 0.00 | 0.00% |
| 11 | 20.167 | 20.167 | 20.167 | | | 20.167 | 20.168 | 20.167 | 0.015 | 66.67 | 100% | 60.00 | 90.00% | 6.67 | 10.00% |
| 12 | 18.666 | 18.666 | | | | 18.666 | 18.672 | 18.666 | 0.015 | 440.00 | 100% | 406.67 | 92.42% | 33.33 | 7.58% |
| 13 | 22.777 | 22.776 | | | | 22.776 | 22.779 | 22.776 | 0.015 | 200.00 | 100% | 200.00 | 100.00% | 0.00 | 0.00% |
| 14 | 23.697 | 23.697 | | | | 23.697 | 23.698 | 23.697 | 0.015 | 100.00 | 100% | 93.33 | 93.33% | 6.67 | 6.67% |
| Promedio | | | | | | | | | | | | 88.48% | Promedio | 11.52% | |

| No. de muestra | Pesos constantes de cápsulas | | | | | G | G1 | G2 | V | Efluente | | | | | |
|----------------|------------------------------|--------|--------|--------|---|--------|--------|--------|-------|----------|------|---------|----------|---------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | | | | | ST | STV | Prop. % | STF | Prop. % | |
| 3 | 22.252 | 22.252 | | | | 22.252 | 22.253 | 22.252 | 0.015 | 13.33 | 100% | 13.33 | 100.00% | 0.00 | 0.00% |
| 4 | 22.252 | 22.252 | 22.252 | | | 22.252 | 22.252 | 22.252 | 0.015 | 0.00 | 100% | 0.00 | 0.00% | 0.00 | 0.00% |
| 5 | 23.696 | 23.697 | 23.696 | | | 23.696 | 23.696 | 23.696 | 0.015 | 0.00 | 100% | 0.00 | 0.00% | 0.00 | 0.00% |
| 6 | 2.540 | 20.540 | 20.540 | | | 20.540 | 20.540 | 20.540 | 0.015 | 6.67 | 100% | 6.67 | 100.00% | 0.00 | 0.00% |
| 7 | 22.253 | 22.253 | 22.253 | 22.253 | | 22.253 | 22.253 | 22.253 | 0.015 | 6.67 | 100% | 6.67 | 100.00% | 0.00 | 0.00% |
| 8 | 20.167 | 2.168 | 20.167 | 20.168 | | 20.168 | 20.168 | 20.168 | 0.015 | 6.67 | 100% | 0.00 | 0.00% | 6.67 | 0.00% |
| 9 | 20.540 | 20.540 | 20.540 | 20.540 | | 20.540 | 20.540 | 20.540 | 0.015 | 20.00 | 100% | 20.00 | 100.00% | 0.00 | 0.00% |
| 10 | 22.777 | 22.777 | 22.777 | | | 22.777 | 22.777 | 22.777 | 0.015 | 0.00 | 100% | 0.00 | 0.00% | 0.00 | 0.00% |
| 11 | 20.540 | 20.540 | | | | 20.540 | 20.541 | 20.540 | 0.015 | 6.67 | 100% | 6.67 | 100.00% | 0.00 | 0.00% |
| 12 | 23.492 | 23.492 | | | | 23.492 | 23.492 | 23.492 | 0.015 | 13.33 | 100% | 0.00 | 0.00% | 13.33 | 0.00% |
| 13 | 22.924 | 22.925 | | | | 22.925 | 22.925 | 22.925 | 0.015 | 13.33 | 100% | 13.33 | 100.00% | 0.00 | 0.00% |
| 14 | 20.168 | 20.168 | | | | 20.168 | 20.168 | 20.168 | 0.015 | 13.33 | 100% | 13.33 | 100.00% | 0.00 | 0.00% |
| Promedio | | | | | | | | | | | | 58.33% | Promedio | 0.00% | |

Fórmulas empleadas

Para el contenido de Sólidos Suspendidos Totales:

$$SST = (G1 - G) * 1000 / V$$

en donde:

SST= Son los sólidos suspendidos totales (mg/L)

G= Es el peso inicial del Gooch (g)

G1= Es el peso final del Gooch (g)

V= Es el volumen muestra (L)

Para el contenido de Sólidos Suspendidos Volátiles:

$$SSV = (G1 - G2) * 1000 / V$$

en donde:

SST= Son los sólidos suspendidos totales (mg/L)

G2= Es el peso después de calcinación (g)

G1= Es el peso final del Gooch (g)

V= Es el volumen muestra (L)

Para el contenido de Sólidos Suspendidos Fijos:

$$SSF = SST - SSV$$

en donde:

SST= Son los sólidos suspendidos totales (mg/L)

SSV= Son los sólidos suspendidos volátiles (mg/L)

| Remoción | | | | | |
|----------|---------|----------|---------|----------|---------|
| SST | % | SSV | % | SSF | % |
| 33.33 | 71.43% | 33.33 | 71.43% | 0.00 | - |
| 60.00 | 100.00% | 53.33 | 100.00% | 6.67 | 100.00% |
| 93.33 | 100.00% | 66.67 | 100.00% | 26.67 | 100.00% |
| 13.33 | 66.67% | 0.00 | 0.00% | 13.33 | 100.00% |
| 66.67 | 90.91% | 66.67 | 90.91% | 0.00 | - |
| 80.00 | 92.31% | 80.00 | 100.00% | 0.00 | 0.00% |
| 26.67 | 57.14% | 26.67 | 57.14% | 0.00 | - |
| 40.00 | 100.00% | 40.00 | 100.00% | 0.00 | - |
| 60.00 | 90.00% | 53.33 | 88.89% | 6.67 | 100.00% |
| 426.67 | 96.97% | 406.67 | 100.00% | 20.00 | 60.00% |
| 186.67 | 93.33% | 186.67 | 93.33% | 0.00 | - |
| 86.67 | 86.67% | 80.00 | 85.71% | 6.67 | 100.00% |
| Promedio | 87.12% | Promedio | 82.28% | Promedio | 80.00% |

ANEXO 10- CONCENTRACION DE pH Y TURBIDEZ EN EL VERDEM

| No. De Muestra | Potencial de Hidrogeniones (pH) | | Turbidez (UTN) | | |
|----------------|---------------------------------|----------|----------------|----------|--------------|
| | Afluente | Efluente | Afluente | Efluente | Remoción (%) |
| 1 | 6.57 | 6.99 | 38.50 | 1.30 | 96.6% |
| 2 | 7.10 | 7.04 | 67.20 | 1.70 | 97.5% |
| 3 | 7.36 | 8.73 | 53.30 | 1.30 | 97.6% |
| 4 | 6.86 | 7.82 | 13.10 | 0.80 | 93.9% |
| 5 | 7.400 | 7.84 | 18.40 | 1.20 | 93.5% |
| 6 | 7.080 | 7.18 | 9.200 | 1.50 | 83.7% |
| 7 | 6.69 | 7.44 | 41.90 | 1.60 | 96.2% |
| 8 | 6.85 | 7.43 | 29.80 | 1.80 | 94.0% |
| 9 | 6.67 | 7.11 | 28.20 | 1.00 | 96.5% |
| 10 | 6.66 | 7.06 | 34.50 | 1.10 | 96.8% |
| 11 | 6.58 | 6.99 | 24.10 | 2.00 | 91.7% |
| 12 | 7.01 | 6.98 | 170.00 | 2.30 | 98.6% |
| 13 | 6.89 | 6.86 | 108.40 | 17.60 | 83.8% |
| 14 | 5.69 | 6.78 | 83.10 | 32.20 | 61.3% |
| Promedio | 6.82 | 7.30 | | Promedio | 91.5% |

ANEXO 11- REPORTE FOTOGRÁFICO DEL CRECIMIENTO DE PLANTAS EN EL VERDEM



ANEXO 12- DATOS DE LAS DIFERENCIAS DE TEMPERATURAS OBTENIDAS

| Fecha | Módulo | Enfrente | Atrás | Diferencia | Enfrente | Atrás | Diferencia | Enfrente | Atrás | Diferencia | Enfrente | Atrás | Diferencia |
|------------|--------|----------|-------|------------|----------|-------|------------|----------|-------|------------|----------|-------|------------|
| | | 10:00 | 10:00 | | 11:00 | 11:00 | | 12:00 | 12:00 | | 1:00 | 1:00 | |
| 01/03/2017 | H1 | 24.0 | 23.5 | 0.5 | 27.0 | 26.5 | 0.5 | 26.0 | 24.0 | 2.0 | - | - | |
| | H2 | 24.0 | 20.2 | 3.8 | 25.0 | 20.9 | 4.1 | 24.0 | 21.6 | 2.4 | - | - | |
| | H3 | 23.0 | 20.8 | 2.2 | 24.5 | 20.6 | 3.9 | 28.0 | 21.1 | 6.9 | - | - | |
| | H4 | 22.0 | 19.8 | 2.2 | 23.0 | 20.6 | 2.4 | 25.0 | 21.2 | 3.8 | - | - | |
| | H5 | 22.0 | 19.7 | 2.3 | 25.0 | 20.7 | 4.3 | 26.0 | 21.3 | 4.7 | - | - | |
| 15/03/2017 | H1 | - | - | | - | - | | 21.0 | 21.3 | | 21.4 | 21.0 | |
| | H2 | - | - | | - | - | | 23.0 | 19.3 | | 22.0 | 19.9 | |
| | H3 | - | - | | - | - | | 21.0 | 19.0 | | 23.0 | 20.1 | |
| | H4 | - | - | | - | - | | 22.0 | 19.3 | | 23.0 | 20.1 | |
| | H5 | - | - | | - | - | | 22.0 | 19.3 | | 23.0 | 20.2 | |
| 16/03/2017 | H1 | 21.0 | 22.0 | | 24.0 | 21.1 | 2.9 | 26.0 | 20.9 | 5.1 | 25.0 | 21.4 | 3.6 |
| | H2 | 23.0 | 19.2 | 3.8 | 24.0 | 19.9 | 4.1 | 22.0 | 20.3 | 1.7 | 26.0 | 20.6 | 5.4 |
| | H3 | 23.0 | 19.5 | 3.5 | 23.0 | 19.6 | 3.4 | 23.0 | 20.6 | 2.4 | 24.0 | 20.5 | 3.5 |
| | H4 | 22.5 | 19.1 | 3.4 | 24.0 | 19.3 | 4.7 | 23.0 | 20.1 | 2.9 | 24.0 | 20.5 | 3.5 |
| | H5 | 24.0 | 18.6 | 5.4 | 25.0 | 19.5 | 5.5 | 24.0 | 20.1 | 3.9 | 24.0 | 20.6 | 3.4 |
| 17/03/2017 | H1 | 22.0 | 20.5 | 1.5 | 23.0 | 20.7 | 2.3 | 24.5 | 21.8 | 2.7 | 24.5 | 22.0 | 2.5 |
| | H2 | 23.0 | 19.3 | 3.7 | 22.0 | 20.2 | 1.8 | 23.0 | 20.7 | 2.3 | 24.5 | 21.2 | 3.3 |
| | H3 | 21.5 | 20.1 | 1.4 | 22.5 | 21.1 | 1.4 | 22.5 | 21.2 | 1.3 | 24.5 | 21.6 | 2.9 |
| | H4 | 21.5 | 20.3 | 1.2 | 22.0 | 20.2 | 1.8 | 22.0 | 20.7 | 1.3 | 24.0 | 20.9 | 3.1 |
| | H5 | 20.0 | 19.2 | 0.8 | 22.0 | 20.3 | 1.7 | 21.0 | 20.8 | 0.2 | 24.0 | 21.3 | 2.7 |
| 22/03/2017 | H1 | - | - | | - | - | | 26.5 | 24.1 | | 28.0 | 24.3 | |
| | H2 | - | - | | - | - | | 26.5 | 23.1 | | 28.5 | 23.4 | |
| | H3 | - | - | | - | - | | 27.0 | 23.1 | | 27.5 | 23.6 | |
| | H4 | - | - | | - | - | | 27.0 | 23.0 | | 27.0 | 23.3 | |
| | H5 | - | - | | - | - | | 25.0 | 23.4 | | 26.5 | 23.6 | |
| 23/03/2017 | H1 | 26.0 | 23.1 | 2.9 | 26.0 | 23.2 | 2.8 | 29.0 | 23.8 | 5.2 | 28.0 | 24.4 | 3.6 |
| | H2 | 24.5 | 22.6 | 1.9 | 25.0 | 22.6 | 2.4 | 28.0 | 22.8 | 5.2 | 27.5 | 23.5 | 4.0 |
| | H3 | 24.0 | 23.6 | 0.4 | 26.0 | 22.7 | 3.3 | 27.0 | 22.8 | 4.2 | 26.0 | 23.8 | 2.2 |
| | H4 | 24.0 | 22.3 | 1.7 | 26.0 | 22.1 | 3.9 | 27.0 | 22.8 | 4.2 | 25.5 | 23.1 | 2.4 |
| | H5 | 23.0 | 21.1 | 1.9 | 24.5 | 21.4 | 3.1 | 26.0 | 23.2 | 2.8 | 25.5 | 24.0 | 1.5 |

| | | | | | | | | | | | | | |
|------------|----|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|------|------|-----|
| 27/03/2017 | H1 | 26.0 | 24.9 | 1.1 | 27.5 | 25.2 | 2.3 | 27.0 | 25.2 | 1.8 | 28.0 | 25.5 | 2.5 |
| | H2 | 25.0 | 24.1 | 0.9 | 27.5 | 24.0 | 3.5 | 28.0 | 24.3 | 3.7 | 28.5 | 24.0 | 4.5 |
| | H3 | 25.0 | 24.2 | 0.8 | 27.0 | 24.1 | 2.9 | 27.0 | 24.1 | 2.9 | 26.5 | 23.5 | 3.0 |
| | H4 | 26.0 | 23.8 | 2.2 | 28.0 | 24.2 | 3.8 | 27.0 | 24.1 | 2.9 | 27.0 | 23.8 | 3.2 |
| | H5 | 26.0 | 21.5 | 4.5 | 28.0 | 23.3 | 4.7 | 27.0 | 23.9 | 3.1 | 27.0 | 23.8 | 3.2 |
| 29/03/2017 | H1 | - | - | - | - | - | - | 27.5 | 26.5 | - | 28.0 | 25.7 | - |
| | H2 | - | - | - | - | - | - | 28.0 | 25.8 | - | 29.0 | 25.3 | - |
| | H3 | - | - | - | - | - | - | 27.0 | 25.8 | - | 27.5 | 25.1 | - |
| | H4 | - | - | - | - | - | - | 28.0 | 25.3 | - | 27.5 | 25.1 | - |
| | H5 | - | - | - | - | - | - | 27.0 | 25.3 | - | 27.0 | 25.6 | - |
| 30/03/2017 | H1 | 27.0 | 26.5 | 0.5 | 30.0 | 26.2 | 3.8 | 30.0 | 26.6 | 3.4 | 28.0 | 26.5 | 1.5 |
| | H2 | 28.0 | 26.2 | 1.8 | 28.0 | 25.7 | 2.3 | 30.0 | 25.6 | 4.4 | 29.5 | 25.8 | 3.7 |
| | H3 | 29.5 | 26.3 | 3.2 | 28.5 | 25.8 | 2.7 | 29.0 | 25.4 | 3.6 | 27.5 | 25.1 | 2.4 |
| | H4 | 29.0 | 26.1 | 2.9 | 29.0 | 25.1 | 3.9 | 28.0 | 25.6 | 2.4 | 26.5 | 25.1 | 1.4 |
| | H5 | 28.0 | 24.9 | 3.1 | 28.0 | 23.8 | 4.2 | 28.0 | 25.0 | 3.0 | 28.0 | 25.2 | 2.8 |
| 31/03/2017 | H1 | 24.5 | 23.3 | 1.2 | 28.0 | 23.8 | 4.2 | 26.0 | 23.9 | 2.1 | 26.0 | 24.3 | 1.7 |
| | H2 | 25.0 | 23.2 | 1.8 | 29.0 | 23.3 | 5.7 | 26.0 | 23.3 | 2.7 | 26.5 | 23.7 | 2.8 |
| | H3 | 25.0 | 23.3 | 1.7 | 28.0 | 23.5 | 4.5 | 25.0 | 23.3 | 1.7 | 26.0 | 23.7 | 2.3 |
| | H4 | 25.0 | 23.0 | 2.0 | 27.0 | 23.3 | 3.7 | 25.0 | 23.3 | 1.7 | 26.0 | 23.4 | 2.6 |
| | H5 | 25.0 | 22.6 | 2.4 | 26.0 | 23.3 | 2.7 | 26.0 | 23.8 | 2.2 | 25.5 | 23.4 | 2.1 |
| 5/04/2017 | H1 | - | - | - | - | - | - | 30.5 | 27.4 | 3.1 | 31.0 | 27.6 | 3.4 |
| | H2 | - | - | - | - | - | - | 32.0 | 26.6 | 5.4 | 31.0 | 26.5 | 4.5 |
| | H3 | - | - | - | - | - | - | 30.0 | 27.1 | 2.9 | 29.0 | 26.5 | 2.5 |
| | H4 | - | - | - | - | - | - | 29.5 | 26.7 | 2.8 | 29.0 | 26.1 | 2.9 |
| | H5 | - | - | - | - | - | - | 28.0 | 26.6 | 1.4 | 28.5 | 27.1 | 1.4 |
| 6/04/2017 | H1 | - | - | - | 26.0 | 26.7 | -0.7 | 26.5 | 25.9 | 0.6 | 29.0 | 26.2 | 2.8 |
| | H2 | - | - | - | 26.0 | 25.3 | 0.7 | 27.5 | 25.4 | 2.1 | 28.0 | 25.6 | 2.4 |
| | H3 | - | - | - | 27.0 | 26.1 | 0.9 | 26.5 | 25.2 | 1.3 | 27.0 | 25.6 | 1.4 |
| | H4 | - | - | - | 27.0 | 25.9 | 1.1 | 27.0 | 25.1 | 1.9 | 27.0 | 25.6 | 1.4 |
| | H5 | - | - | - | 26.0 | 24.6 | 1.4 | 26.0 | 24.4 | 1.6 | 27.5 | 25.8 | 1.7 |
| 17/04/2017 | H1 | 21.0 | 25.4 | -4.4 | 24.0 | 26.0 | -2.0 | 26.0 | 24.5 | 1.5 | 26.0 | 24.4 | 1.6 |
| | H2 | 21.5 | 22.5 | - | 25.0 | 23.6 | 1.4 | 25.0 | 23.8 | 1.2 | 27.0 | 23.9 | 3.1 |
| | H3 | 22.0 | 23.8 | -1.8 | 24.0 | 23.8 | 0.2 | 26.0 | 24.5 | 1.5 | 25.0 | 24.1 | 0.9 |
| | H4 | 23.0 | 24.4 | -1.4 | 24.0 | 24.8 | -0.8 | 26.0 | 24.2 | 1.8 | 25.0 | 24.2 | 0.8 |
| | H5 | 21.0 | 24.2 | -3.2 | 23.0 | 23.2 | -0.2 | 27.0 | 24.1 | 2.9 | 25.0 | 24.3 | 0.7 |

| | | | | | | | | | | | | | |
|------------|----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|
| 19/04/2017 | H1 | - | - | - | - | - | 24.0 | 23.7 | 0.3 | 25.0 | 23.1 | 1.9 | |
| | H2 | - | - | - | - | - | 24.0 | 23.6 | 0.4 | 24.0 | 22.9 | 1.1 | |
| | H3 | - | - | - | - | - | 24.0 | 23.7 | 0.3 | 24.0 | 23.0 | 1.0 | |
| | H4 | - | - | - | - | - | 24.0 | 23.3 | 0.7 | 24.0 | 22.8 | 1.2 | |
| | H5 | - | - | - | - | - | 23.0 | 22.5 | 0.5 | 24.0 | 22.7 | 1.3 | |
| 20/04/2017 | H1 | 24.0 | 25.0 | | 25.0 | 25.0 | 0.0 | 25.0 | 24.2 | 0.8 | 26.0 | 23.9 | 2.1 |
| | H2 | 24.0 | 24.0 | 0.0 | 21.0 | 23.1 | -2.1 | 26.0 | 23.9 | 2.1 | 28.0 | 23.9 | 4.1 |
| | H3 | 24.0 | 24.0 | 0.0 | 21.0 | 23.1 | -2.1 | 26.0 | 24.0 | 2.0 | 26.0 | 24.1 | 1.9 |
| | H4 | 24.0 | 23.1 | 0.9 | 26.0 | 24.0 | 2.0 | 25.0 | 24.0 | 1.0 | 26.0 | 23.8 | 2.2 |
| | H5 | 20.0 | 19.8 | 0.2 | 22.0 | 21.5 | 0.5 | 25.0 | 22.1 | 2.9 | 26.0 | 23.1 | 2.9 |
| 21/04/2017 | H1 | 26.0 | 26.6 | -0.6 | 26.0 | 26.2 | -0.2 | 27.0 | 24.9 | 2.1 | 28.0 | 24.8 | 3.2 |
| | H2 | 25.0 | 24.6 | 0.4 | 27.0 | 25.6 | 1.4 | 28.0 | 24.7 | 3.3 | 28.0 | 24.7 | 3.3 |
| | H3 | 25.0 | 24.2 | 0.8 | 28.0 | 26.6 | 1.4 | 28.0 | 25.2 | 2.8 | 27.0 | 24.9 | 2.1 |
| | H4 | 23.0 | 23.1 | -0.1 | 26.0 | 25.0 | 1.0 | 28.0 | 24.2 | 3.8 | 27.0 | 24.6 | 2.4 |
| | H5 | 26.0 | 22.5 | 3.5 | 25.0 | 22.7 | 2.3 | 26.0 | 23.2 | 2.8 | 27.0 | 24.3 | 2.7 |
| 24/04/2017 | H1 | - | - | | 28.0 | 27.0 | 1.0 | 30.0 | 26.6 | 3.4 | 28.5 | 26.2 | 2.3 |
| | H2 | - | - | | 29.0 | 26.3 | 2.7 | 32.0 | 26.2 | 5.8 | 28.5 | 26.1 | 2.4 |
| | H3 | - | - | | 31.0 | 27.6 | 3.4 | 30.0 | 26.5 | 3.5 | 31.0 | 26.2 | 4.8 |
| | H4 | - | - | | 28.0 | 25.7 | 2.3 | 32.0 | 25.9 | 6.1 | 28.0 | 26.0 | 2.0 |
| | H5 | - | - | | 26.0 | 23.7 | 2.3 | 29.0 | 25.2 | 3.8 | 27.0 | 26.2 | 0.8 |
| 26/04/2017 | H1 | - | - | | - | - | | 33.0 | 26.6 | 6.4 | 28.0 | 26.8 | 1.2 |
| | H2 | - | - | | - | - | | 30.0 | 26.2 | 3.8 | 28.0 | 26.8 | 1.2 |
| | H3 | - | - | | - | - | | 31.0 | 26.6 | 4.4 | 30.0 | 27.1 | 2.9 |
| | H4 | - | - | | - | - | | 34.0 | 26.6 | 7.4 | 28.0 | 27.0 | 1.0 |
| | H5 | - | - | | - | - | | 30.0 | 25.1 | 4.9 | 30.0 | 26.6 | 3.4 |
| 27/04/2017 | H1 | 25.0 | 24.6 | 0.4 | 30.0 | 27.3 | 2.7 | 26.0 | 25.5 | 0.5 | - | - | |
| | H2 | 25.0 | 25.2 | -0.2 | 29.0 | 25.5 | 3.5 | 28.0 | 24.7 | 3.3 | - | - | |
| | H3 | 25.0 | 26.6 | -1.6 | 30.0 | 28.1 | 1.9 | 27.5 | 24.6 | 2.9 | - | - | |
| | H4 | 26.0 | 24.5 | 1.5 | 28.0 | 27.2 | 0.8 | 28.5 | 26.0 | 2.5 | - | - | |
| | H5 | 24.0 | 23.8 | 0.2 | 27.5 | 23.0 | 4.5 | 26.5 | 24.8 | 1.7 | - | - | |
| 28/04/2017 | H1 | 27.0 | 29.0 | -2.0 | 29.5 | 27.0 | 2.5 | 37.0 | 27.2 | 9.8 | 32.0 | 27.3 | 4.7 |
| | H2 | 27.5 | 27.3 | 0.2 | 30.0 | 26.7 | 3.3 | 37.0 | 26.8 | 10.2 | 34.0 | 27.0 | 7.0 |
| | H3 | 28.0 | 29.3 | -1.3 | 29.5 | 27.7 | 1.8 | 37.0 | 27.8 | 9.2 | 32.0 | 27.9 | 4.1 |
| | H4 | 34.0 | 25.6 | 8.4 | 30.0 | 26.1 | 3.9 | 35.0 | 26.7 | 8.3 | 31.0 | 26.5 | 4.5 |
| | H5 | 27.5 | 24.3 | 3.2 | 31.0 | 25.8 | 5.2 | 31.0 | 25.2 | 5.8 | 31.0 | 25.7 | 5.3 |

| 03/05/2017 | H1 | - | - | - | - | - | - | 28.0 | 26.7 | 1.3 | 31.0 | 26.6 | 4.4 | |
|------------|--------|----------------------|--------------------|-------|----------------------|--------------------|-------|----------------------|--------------------|-------|----------------------|--------------------|------|--------------------------|
| | H2 | - | - | - | - | - | - | 32.0 | 24.6 | 7.4 | 31.0 | 26.7 | 4.3 | |
| | H3 | - | - | - | - | - | - | 31.0 | 26.8 | 4.2 | 31.5 | 27.3 | 4.2 | |
| | H4 | - | - | - | - | - | - | 34.0 | 26.2 | 7.8 | 32.0 | 27.1 | 4.9 | |
| | H5 | - | - | - | - | - | - | 29.0 | 24.6 | 4.4 | 30.0 | 26.2 | 3.8 | |
| 04/05/2017 | H1 | 25.0 | 23.6 | 1.4 | 29.0 | 25.5 | 3.5 | 30.0 | 25.5 | 4.5 | 28.0 | 25.4 | 2.6 | |
| | H2 | 25.0 | 23.6 | 1.4 | 29.0 | 26.0 | 3.0 | 31.5 | 26.0 | 5.5 | 30.0 | 25.3 | 4.7 | |
| | H3 | 27.0 | 23.6 | 3.4 | 34.0 | 27.1 | 6.9 | 33.0 | 27.1 | 5.9 | 30.0 | 26.4 | 3.6 | |
| | H4 | 26.5 | 23.6 | 2.9 | 28.5 | 24.1 | 4.4 | 35.0 | 24.1 | 10.9 | 32.0 | 25.9 | 6.1 | |
| | H5 | 25.0 | 23.6 | 1.4 | 26.0 | 23.3 | 2.7 | 29.0 | 23.3 | 5.7 | 28.0 | 25.6 | 2.4 | |
| PROMEDIO | 24.60 | 23.29 | 1.31 | 26.47 | 24.02 | 2.45 | 27.44 | 24.16 | 3.43 | 27.28 | 24.45 | 2.83 | | |
| Fecha | Módulo | Cara Interior Módulo | Cara Interior Muro | Dif. | Cara Interior Módulo | Cara Interior Muro | Dif. | Cara Interior Módulo | Cara Interior Muro | Dif. | Cara Interior Módulo | Cara Interior Muro | Dif. | Temp. Interior Humedales |
| | | 10:00 | 10:00 | | 11:00 | 11:00 | | 12:00 | 12:00 | | 1:00 | 1:00 | | 12:00 |
| 3/10/2017 | H1 | 17.9 | 20.2 | 2.3 | 18.8 | 22.0 | 3.2 | 19.8 | 23.6 | 3.8 | - | - | - | 19.0 |
| | H2 | 17.8 | 20.0 | 2.2 | 18.3 | 21.6 | 3.3 | 18.9 | 22.6 | 3.7 | - | - | - | 18.0 |
| | H3 | 17.3 | 19.5 | 2.2 | 17.9 | 21.2 | 3.3 | 18.4 | 22.9 | 4.5 | - | - | - | 18.0 |
| | H4 | 17.2 | 19.3 | 2.1 | 17.6 | 20.8 | 3.2 | 18.3 | 22.3 | 4.0 | - | - | - | 18.0 |
| | H5 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 19.0 |
| 3/15/2017 | H1 | - | - | - | - | - | - | 18.6 | 20.0 | 1.4 | 19.1 | 21.0 | 1.9 | 18.0 |
| | H2 | - | - | - | - | - | - | 18.0 | 19.6 | 1.6 | 18.2 | 20.5 | 2.3 | 16.5 |
| | H3 | - | - | - | - | - | - | 17.6 | 19.3 | 1.7 | 17.9 | 20.1 | 2.2 | 16.0 |
| | H4 | - | - | - | - | - | - | 17.5 | 19.2 | 1.7 | 17.7 | 19.8 | 2.1 | 16.5 |
| | H5 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 17.5 |
| 3/16/2017 | H1 | 15.4 | 17.7 | 2.3 | 16.4 | 19.6 | 3.2 | 15.9 | 19.6 | 3.7 | 18.0 | 20.8 | 2.8 | 20.0 |
| | H2 | 15.2 | 17.6 | 2.4 | 15.6 | 19.1 | 3.5 | 14.6 | 18.8 | 4.2 | 16.2 | 19.8 | 3.6 | 18.0 |
| | H3 | 15.1 | 17.0 | 1.9 | 15.3 | 18.6 | 3.3 | 14.4 | 18.3 | 3.9 | 15.7 | 19.8 | 4.1 | 17.5 |
| | H4 | 15.0 | 16.8 | 1.8 | 15.1 | 18.4 | 3.3 | 14.3 | 17.5 | 3.2 | 15.7 | 18.7 | 3.0 | 18.0 |
| | H5 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 19.0 |
| 3/17/2017 | H1 | 14.1 | 16.8 | 2.7 | 17.7 | 21.1 | 3.4 | 18.5 | 22.3 | 3.8 | 20.1 | 23.1 | 3.0 | 21.0 |
| | H2 | 14.0 | 16.6 | 2.6 | 16.6 | 20.7 | 4.1 | 17.0 | 21.4 | 4.4 | 18.0 | 21.8 | 3.8 | 19.0 |
| | H3 | 13.9 | 16.3 | 2.4 | 16.3 | 20.0 | 3.7 | 16.8 | 20.5 | 3.7 | 18.1 | 21.1 | 3.0 | 20.0 |
| | H4 | 13.8 | 15.9 | 2.1 | 15.8 | 19.2 | 3.4 | 16.3 | 19.9 | 3.6 | 17.2 | 20.9 | 3.7 | 18.0 |
| | H5 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 18.5 |

| | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------|----|------|------|-----|------|------|-----|------|------|-----|------|------|-----|------|
| 3/22/2017 | H1 | 23.9 | - | - | - | - | - | 20.5 | 24.5 | 4.0 | 21.1 | 24.6 | 3.5 | 24.0 |
| | H2 | 23.3 | - | - | - | - | - | 19.0 | 23.7 | 4.7 | 19.2 | 23.4 | 4.2 | 20.0 |
| | H3 | 23.3 | - | - | - | - | - | 18.4 | 23.1 | 4.7 | 18.4 | 22.4 | 4.0 | 21.0 |
| | H4 | 23.3 | - | - | - | - | - | 18.1 | 22.7 | 4.6 | 18.1 | 21.5 | 3.4 | 20.0 |
| | H5 | 23.7 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 21.0 |
| 3/23/2017 | H1 | 12.1 | 15.1 | 3.0 | 14.8 | 19.2 | 4.4 | 19.3 | 23.6 | 4.3 | 21.7 | 25.3 | 3.6 | 23.0 |
| | H2 | 12.6 | 15.4 | 2.8 | 14.1 | 19.0 | 4.9 | 18.1 | 23.1 | 5.0 | 19.9 | 24.0 | 4.1 | 21.0 |
| | H3 | 12.6 | 15.1 | 2.5 | 13.9 | 18.6 | 4.7 | 17.6 | 22.0 | 4.4 | 18.5 | 21.4 | 2.9 | 20.0 |
| | H4 | 12.8 | 15.1 | 2.3 | 13.8 | 15.3 | 1.5 | 16.6 | 19.0 | 2.4 | 18.8 | 21.1 | 2.3 | 20.0 |
| | H5 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 19.0 |
| 3/27/2017 | H1 | 19.4 | 22.5 | 3.1 | 21.1 | 24.2 | 3.1 | 20.1 | 24.3 | 4.2 | 22.0 | 25.1 | 3.1 | 19.0 |
| | H2 | 18.8 | 21.9 | 3.1 | 19.0 | 23.5 | 4.5 | 18.5 | 23.2 | 4.7 | 20.5 | 24.6 | 4.1 | 17.0 |
| | H3 | 18.3 | 21.5 | 3.2 | 18.7 | 23.0 | 4.3 | 18.4 | 22.6 | 4.2 | 19.6 | 23.6 | 4.0 | 2.0 |
| | H4 | 18.0 | 21.2 | 3.2 | 18.5 | 23.3 | 4.8 | 18.0 | 21.0 | 3.0 | 19.5 | 20.6 | 1.1 | 21.0 |
| | H5 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 20.0 |
| 3/29/2017 | H1 | - | - | - | - | - | - | 22.8 | 26.4 | 3.6 | 24.1 | 27.2 | 3.1 | 28.0 |
| | H2 | - | - | - | - | - | - | 20.6 | 25.8 | 5.2 | 21.8 | 26.5 | 4.7 | 27.0 |
| | H3 | - | - | - | - | - | - | 20.0 | 24.9 | 4.9 | 21.4 | 25.5 | 4.1 | 26.0 |
| | H4 | - | - | - | - | - | - | 19.5 | 24.1 | 4.6 | 20.6 | 22.3 | 1.7 | 21.5 |
| | H5 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 23.0 |
| 3/30/2017 | H1 | 19.3 | 22.7 | 3.4 | 21.9 | 25.7 | 3.8 | 23.5 | 27.4 | 3.9 | 24.2 | 27.3 | 3.1 | 26.0 |
| | H2 | 18.6 | 22.6 | 4.0 | 21.1 | 25.6 | 4.5 | 21.8 | 26.7 | 4.9 | 22.1 | 26.1 | 4.0 | 23.0 |
| | H3 | 18.8 | 22.1 | 3.3 | 21.5 | 24.6 | 3.1 | 21.6 | 25.6 | 4.0 | 21.4 | 25.2 | 3.8 | 22.0 |
| | H4 | 18.3 | 21.8 | 3.5 | 20.2 | 24.2 | 4.0 | 20.8 | 25.5 | 4.7 | 22.0 | 25.1 | 3.1 | 22.0 |
| | H5 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 22.0 |
| 3/31/2017 | H1 | 20.5 | 21.3 | 0.8 | 21.1 | 22.5 | 1.4 | 21.9 | 23.5 | 1.6 | 22.5 | 24.3 | 1.8 | 24.0 |
| | H2 | 20.4 | 21.2 | 0.8 | 20.6 | 22.5 | 1.9 | 20.5 | 23.4 | 2.9 | 21.0 | 23.9 | 2.9 | 22.0 |
| | H3 | 20.1 | 20.9 | 0.8 | 20.9 | 21.8 | 0.9 | 20.4 | 22.8 | 2.4 | 20.8 | 23.0 | 2.2 | 21.0 |
| | H4 | 20.3 | 20.5 | 0.2 | 20.6 | 21.9 | 1.3 | 20.3 | 22.3 | 2.0 | 20.4 | 22.6 | 2.2 | 21.0 |
| | H5 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 21.0 |
| 4/5/2017 | H1 | - | - | - | - | - | - | 22.7 | 26.0 | 3.3 | 23.1 | 26.7 | 3.6 | 20.0 |
| | H2 | - | - | - | - | - | - | 21.9 | 25.6 | 3.7 | 22.0 | 26.8 | 4.8 | 22.0 |
| | H3 | - | - | - | - | - | - | 22.0 | 24.8 | 2.8 | 22.5 | 25.8 | 3.3 | 22.5 |
| | H4 | - | - | - | - | - | - | 21.6 | 25.1 | 3.5 | 22.0 | 25.8 | 3.8 | 22.5 |
| | H5 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 23.0 |

| | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------|----|------|------|------|------|------|-----|------|------|-----|------|------|-----|------|
| 4/6/2017 | H1 | 21.8 | 22.2 | 0.4 | 20.5 | 22.3 | 1.8 | 22.1 | 24.5 | 2.4 | 23.5 | 26.5 | 3.0 | 22.5 |
| | H2 | 21.6 | 22.2 | 0.6 | 20.4 | 22.4 | 2.0 | 21.6 | 24.6 | 3.0 | 22.3 | 25.8 | 3.5 | 22.0 |
| | H3 | 21.3 | 21.5 | 0.2 | 19.5 | 21.7 | 2.2 | 21.5 | 23.5 | 2.0 | 21.9 | 24.6 | 2.7 | 21.0 |
| | H4 | 21.2 | 21.4 | 0.2 | 19.6 | 21.3 | 1.7 | 21.0 | 23.0 | 2.0 | 21.8 | 24.8 | 3.0 | 21.0 |
| | H5 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 21.0 |
| 4/17/2017 | H1 | 19.4 | 18.3 | -1.1 | 17.6 | 19.0 | 1.4 | 19.1 | 22.5 | 3.4 | 21.8 | 24.3 | 2.5 | 20.0 |
| | H2 | 19.4 | 18.5 | -0.9 | 17.6 | 18.7 | 1.1 | 18.9 | 21.4 | 2.5 | 20.6 | 24.1 | 3.5 | 19.0 |
| | H3 | 19.3 | 18.3 | - | 17.9 | 18.8 | 0.9 | 19.3 | 20.8 | 1.5 | 20.4 | 23.6 | 3.2 | 21.0 |
| | H4 | 19.4 | 18.5 | -0.9 | 17.6 | 18.9 | 1.3 | 19.6 | 21.2 | 1.6 | 21.0 | 23.3 | 2.3 | 20.0 |
| | H5 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 18.0 |
| 4/19/2017 | H1 | - | - | - | - | - | - | 19.6 | 23.6 | 4.0 | 19.5 | 23.6 | 4.1 | 18.0 |
| | H2 | - | - | - | - | - | - | 19.0 | 23.5 | 4.5 | 19.3 | 23.8 | 4.5 | 19.0 |
| | H3 | - | - | - | - | - | - | 19.5 | 22.6 | 3.1 | 18.7 | 22.5 | 3.8 | 17.0 |
| | H4 | - | - | - | - | - | - | 19.5 | 22.5 | 3.0 | 18.5 | 22.4 | 3.9 | 18.0 |
| | H5 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 20.0 |
| 4/20/2017 | H1 | 18.0 | 19.4 | 1.4 | 18.3 | 21.3 | 3.0 | 19.6 | 23.6 | 4.0 | 20.5 | 25.0 | 4.5 | 18.0 |
| | H2 | 18.0 | 19.4 | 1.4 | 17.7 | 21.0 | 3.3 | 19.1 | 23.6 | 4.5 | 19.6 | 24.6 | 5.0 | 17.0 |
| | H3 | 18.5 | 19.5 | 1.0 | 18.0 | 20.8 | 2.8 | 19.1 | 22.8 | 3.7 | 19.6 | 24.0 | 4.4 | 18.0 |
| | H4 | 18.5 | 19.1 | 0.6 | 17.6 | 20.6 | 3.0 | 18.8 | 22.5 | 3.7 | 19.2 | 23.2 | 4.0 | 18.0 |
| | H5 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 18.0 |
| 4/21/2017 | H1 | 19.0 | 20.2 | 1.2 | 19.3 | 21.8 | 2.5 | 20.4 | 24.0 | 3.6 | 20.8 | 25.4 | 4.6 | 18.0 |
| | H2 | 19.0 | 20.0 | 1.0 | 19.3 | 21.6 | 2.3 | 19.5 | 23.6 | 4.1 | 20.3 | 25.0 | 4.7 | 20.0 |
| | H3 | 19.5 | 19.6 | 0.1 | 19.5 | 21.4 | 1.9 | 20.0 | 23.1 | 3.1 | 20.1 | 24.1 | 4.0 | 20.0 |
| | H4 | 19.1 | 19.9 | 0.8 | 18.8 | 21.5 | 2.7 | 19.5 | 23.0 | 3.5 | 19.7 | 24.0 | 4.3 | 20.0 |
| | H5 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 22.0 |
| 4/24/2017 | H1 | 19.7 | 21.4 | 1.7 | 21.1 | 24.4 | 3.3 | 20.9 | 25.0 | 4.1 | - | - | - | 23.0 |
| | H2 | 19.0 | 21.7 | 2.7 | 20.6 | 24.6 | 4.0 | 20.4 | 24.4 | 4.0 | - | - | - | 22.0 |
| | H3 | 19.0 | 21.1 | 2.1 | 21.5 | 24.1 | 2.6 | 20.8 | 23.4 | 2.6 | - | - | - | 21.0 |
| | H4 | 19.2 | 21.3 | 2.1 | 20.3 | 24.0 | 3.7 | 20.5 | 23.5 | 3.0 | - | - | - | 20.0 |
| | H5 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 22.0 |
| 4/26/2017 | H1 | - | - | - | - | - | - | 22.0 | 25.7 | 3.7 | 23.0 | 27.2 | 4.2 | 23.0 |
| | H2 | - | - | - | - | - | - | 22.3 | 25.6 | 3.3 | 22.0 | 27.1 | 5.1 | 22.0 |
| | H3 | - | - | - | - | - | - | 21.8 | 25.2 | 3.4 | 22.9 | 25.9 | 3.0 | 21.0 |
| | H4 | - | - | - | - | - | - | 21.9 | 25.1 | 3.2 | 21.8 | 26.0 | 4.2 | 20.0 |
| | H5 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 22.0 |

| | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------|-------|-------|------|-------|-------|------|-------|-------|------|-------|-------|------|-------|------|
| 4/27/2017 | H1 | 20.0 | 20.0 | 0.0 | 20.8 | 22.3 | 1.5 | 21.7 | 24.4 | 2.7 | - | - | 21.0 | |
| | H2 | 20.2 | 20.2 | 0.0 | 21.1 | 22.6 | 1.5 | 21.3 | 24.2 | 2.9 | - | - | 20.0 | |
| | H3 | 20.5 | 20.5 | 0.0 | 21.0 | 22.3 | 1.3 | 22.0 | 23.7 | 1.7 | - | - | 23.0 | |
| | H4 | 20.3 | 20.3 | 0.0 | 21.0 | 22.3 | 1.3 | 21.4 | 23.6 | 2.2 | - | - | 21.0 | |
| | H5 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 21.0 | |
| 4/28/2017 | H1 | 21.3 | 21.7 | 0.4 | 21.0 | 23.8 | 2.8 | 20.5 | 24.3 | 3.8 | 22.7 | 26.8 | 4.1 | 21.0 |
| | H2 | 21.3 | 21.7 | 0.4 | 20.9 | 23.6 | 2.7 | 20.2 | 23.6 | 3.4 | 22.3 | 26.5 | 4.2 | 21.0 |
| | H3 | 21.3 | 21.6 | 0.3 | 21.2 | 25.2 | 4.0 | 19.3 | 23.1 | 3.8 | 22.3 | 25.8 | 3.5 | 24.0 |
| | H4 | 21.1 | 21.9 | 0.8 | 20.5 | 25.4 | 4.9 | 19.5 | 22.6 | 3.1 | 22.0 | 25.6 | 3.6 | 22.0 |
| | H5 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 23.0 |
| 5/3/2017 | H1 | - | - | - | - | - | - | 23.0 | 25.7 | 2.7 | 23.3 | 26.6 | 3.3 | 21.0 |
| | H2 | - | - | - | - | - | - | 22.8 | 25.4 | 2.6 | 22.6 | 26.5 | 3.9 | 22.0 |
| | H3 | - | - | - | - | - | - | 23.3 | 24.7 | 1.4 | 23.7 | 25.9 | 2.2 | 22.0 |
| | H4 | - | - | - | - | - | - | 22.5 | 24.6 | 2.1 | 22.6 | 25.9 | 3.3 | 21.0 |
| | H5 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 24.0 |
| 5/4/2017 | H1 | 21.9 | 21.8 | -0.1 | 21.9 | 23.2 | 1.3 | 22.3 | 25.2 | 2.9 | 23.0 | 26.0 | 3.0 | 21.0 |
| | H2 | 21.7 | 21.6 | -0.1 | 21.9 | 22.9 | 1.0 | 22.3 | 24.8 | 2.5 | 22.6 | 25.8 | 3.2 | 20.0 |
| | H3 | 21.8 | 21.6 | -0.2 | 21.8 | 22.8 | 1.0 | 22.4 | 24.5 | 2.1 | 23.3 | 25.3 | 2.0 | 24.0 |
| | H4 | 21.8 | 21.6 | -0.2 | 22.1 | 22.8 | 0.7 | 22.2 | 24.3 | 2.1 | 22.5 | 24.7 | 2.2 | 23.0 |
| | H5 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 22.5 |
| PROMEDIO | 18.90 | 19.88 | 1.37 | 19.02 | 21.78 | 2.76 | 19.93 | 23.26 | 3.34 | 20.69 | 24.10 | 3.40 | 20.48 | |

ANEXO 13- CONCENTRACIÓN DE GRASAS Y ACEITES EN EL AFLUENTE Y AFLUENTE DEL VERDEM

| No. de muestra | Pesos constantes de cápsulas (g) | | | | | | | | |
|----------------|----------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| 12 | 101.067 | 101.065 | 101.065 | 101.064 | 101.066 | 101.066 | 101.066 | 101.066 | 101.066 |
| 13 | 119.883 | 119.881 | 119.882 | 119.882 | 119.883 | 119.883 | 119.882 | 119.882 | 119.882 |
| 14 | 123.155 | 123.154 | 123.154 | 123.154 | 123.154 | 123.154 | 123.154 | 123.154 | 123.154 |

| No. de muestra | Pesos constantes de cápsulas (g) | | | | | | | | |
|----------------|----------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| 12 | 97.391 | 97.389 | 97.391 | 97.389 | 97.390 | 97.389 | 97.388 | 97.388 | 97.388 |
| 13 | 96.066 | 96.063 | 96.065 | 96.062 | 96.062 | 96.064 | 96.062 | 96.061 | 96.061 |
| 14 | 91.337 | 91.335 | 91.337 | 91.334 | 91.334 | 91.336 | 91.334 | 91.334 | 91.334 |

Para el cálculo del contenido de Grasas y Aceites

$$GYA = (A - B) / V$$

en donde:

A= es el peso final del matraz de extracción (mg)

B= es el peso inicial del matraz de extracción (mg)

V= es el volumen de la muestra (l)

| Afluente | | | | % |
|-----------|-----------|------|---------|------|
| B | A | V | GYA | |
| 101065.80 | 101320.20 | 0.20 | 1272.00 | 100% |
| 119882.20 | 120201.70 | 0.36 | 887.50 | 100% |
| 123154.10 | 123231.70 | 0.49 | 158.37 | 100% |

| Efluente | | | | Remoción |
|----------|----------|------|--------|----------|
| B | A | V | GYA | |
| 97388.10 | 97569.30 | 0.47 | 385.53 | 69.69% |
| 96061.20 | 96169.40 | 1.00 | 108.20 | 87.81% |
| 91333.70 | 91410.00 | 1.00 | 76.30 | 51.82% |
| | | | | 69.77% |

ANEXO 15- PROCEDIMIENTO PARA LA DETERMINACIÓN DE CONSUMO DE AGUA DE ACUERDO A APÉNDICE INFORMATIVO 8 DE LA NORMA NMX-AA-164-SCFI-2013

| Ubicación de predio: Av. Lago Yuriria Mza. 32 Lt 6 Casa 50, Fracc. Geo Villas de Terranova C.P. 55883 Acolman, Edo de México | | Caso base | | | | | |
|--|----------|--|-------------|-------------|-------|--------------------------------|-----------------------|
| | | Ocupantes | Hombres 50% | Mujeres 50% | Total | Consumo per cápita (L/Hab/día) | Consumo Total (L/Día) |
| Temp. media: | 15.4°C | Permanentes | 2 | 2 | 4 | 100 | 400 |
| Clima: | Templado | Consumo real en Geovillas de Terranova | | | | 140 | 560 |

| 1.- Calcular la cantidad de ocupación permanente y temporal de la edificación. 2.- Considerar 50 % de la ocupación para el género femenino y 50 % para el masculino. A excepción de alguna edificación en donde por razones de su uso específico habitara solamente para un tipo de género (p.e. monasterio). 3.- Calcular el caso base de consumo de agua para la edificación siguiendo los siguientes parámetros: | | Caso propuestos | | | | | | | | |
|---|--|-----------------|------------------------------------|--|--|---------------------------|---------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------|
| | | No. | Ecotecnologías ahorradoras de agua | Consumo (L/min), *(L/descarga) o **(L/carga) | Tiempo de consumo por uso (min) ^a | Consumo total por uso (L) | Usos por día ^a | | Total de usos por día (2xH y 2xM) | Consumo total (L/Día) |
| 1 | Lavabo | 4.80 | 1 | 4.80 | 5 | 5 | 20 | 96.00 | | |
| 2 | WC* | 4.80 | - | 4.80 | 5 | 5 | 20 | 96.00 | | |
| 3 | Regadera | 5.70 | 8 | 45.60 | 1 | 1 | 4 | 182.40 | | |
| 4 | Tarja | 4.80 | 1 | 4.80 | 4 | 4 | 16 | 76.80 | | |
| 5 | Lavadora** | 80 | - | 80.00 | 0.14 | 0.14 | 0.57 | 45.71 | | |
| 6 | Lavadero | 2.14 | 1 | 2.14 | 1 | 1 | 4 | 8.57 | | |
| Consumo doméstico per cápita | | | | | | | | Suma | 505.49 | |
| Clima | Consumo por clase socioeconómica (L/Hab/día) | | | Agua gris tratada y reutilizada: | | | | 100.00 | | |
| | Residencial | Media | Popular | Agua potable consumida neta: | | | | 405.49 | | |
| Cálido | 400 | 230 | 185 | Ahorro de agua de acuerdo a caso base: | | | | -1.37% | | |
| Semicálido | 300 | 205 | 130 | Ahorro de acuerdo a consumo real en Geovillas: | | | | 27.59% | | |
| Templado | 250 | 195 | 100 | Resumen | | | | | | |
| Clasificación de climas por su temperatura | | | | | | | | Producción de agua residual (L/Día) | 405.49 | 100% |
| Temperatura media anual (°C) | | Tipo de clima | | Agua gris tratada (L/Día) | | | | 100.00 | 24.66% | |
| Mayor que 22 | | Cálido | | Agua residual enviada al drenaje (L/Día) | | | | 305.49 | 75.34% | |
| De 18 a 22 | | Semicálido | | | | | | | | |
| De 12 a 17.9 | | Templado | | | | | | | | |
| De 5 a 11.9 | | Semifrío | | | | | | | | |
| Menor que 5 | | Frío | | | | | | | | |

| Clasificación de climas por su temperatura | |
|--|---------------|
| Temperatura media anual (°C) | Tipo de clima |
| Mayor que 22 | Cálido |
| De 18 a 22 | Semicálido |
| De 12 a 17.9 | Templado |
| De 5 a 11.9 | Semifrío |
| Menor que 5 | Frío |

| Resumen | |
|--|--------|
| Producción de agua residual (L/Día) | 405.49 |
| Agua gris tratada (L/Día) | 100.00 |
| Agua residual enviada al drenaje (L/Día) | 305.49 |

6- El consumo se determinó haciendo pruebas en sitio del agua consumida por min.

Nota: El procedimiento llevado a cabo para calcular el caso propuesto fue basado en los procedimientos de LEED BD+C v3, ya que la norma no lo establece claramente.

ECOTECNOLGÍAS AHORRADORAS DE AGUA

23-IR



Mecedora pivote
 20°C/30°C
 30.0-1.2"
 Control control por RF
 Acabado Cromo
 Material Acero



Lavadora Aqua Saver
 Green Automática 19 kg
 Blanco Mabe

LMH70104WBAB0



- 10% de ahorro en los tiempos de lavado en el ciclo.
- 40% de ahorro en agua respecto a los lavadores convencionales.
- La tecnología Aqua Saver permite que el agua se filtre y se recicle en el interior del tambor, reduciendo el consumo de agua en un 40%.



01437021

Taza ASHWELL GSK DUAL Blanco



ORION

CARACTERÍSTICAS

Acabado: Blanco
 Ubicación de agua: 10
 Tecnología:
 • Onda empujante
 • Alceadas
 • Taza Flush
 • Super Flush
 • Aislamiento térmico
 • ErgoTact

8-1



Mecedora pivote de alfiler con cepillos
 Controlador de flujo
 Cromo-RT
 F751111
 Material: Acero



44-CCE



Buzina Triada
 Color: Cromo
 Dimensiones:
 120x100
 Material: Cromo
 01-00111-0012



ANEXO 16- PROCEDIMIENTO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE LA ENVOLVENTE DE ACUERDO A LA NOM-020-ENER-2011

CÁLCULO SIN CONSIDERAR EL VERDEM EN LA FACHADA

1. Descripción del Edificio a Evaluar

| | |
|---------------------------|-------|
| 1.1 Dimensiones Generales | |
| Niveles | 1 |
| Techo | 39.90 |
| Domo | - |
| Muro norte | 25.82 |
| Ventana Norte | 0.25 |
| Puerta Norte | - |
| Muro este | 8.90 |
| Ventana este | 0.43 |
| Puerta este | 1.47 |
| Muro sur | 24.62 |
| Ventana sur | 1.20 |
| Puerta sur | - |
| Muro oeste | 7.13 |
| Ventana oeste | 1.78 |
| Puerta oeste | 1.89 |
| Superficie inf | - |

| | |
|-----------------------------|------|
| 1.2 Dimensiones de ventanas | |
| Ventana Norte | 0.25 |
| Ventana Este | 0.43 |
| Ventana Sur | 1.20 |
| Ventana Oeste | 1.78 |

2. Valores para el Cálculo de la ganancia de Calor a través de la Envoltente

| | | |
|------------|----------------|----|
| 2.1 Ciudad | Chapingo, Tex. | |
| Latitud | 29° | 1' |

2.2. Temperatura equivalente promedio "te" (°C)

| | | |
|-------------------------|--------|--------|
| a) Techo | 32 | |
| b) Superficie inferior | 23 | |
| c) Muros | Masivo | Ligero |
| Norte | 20 | 26 |
| Este | 22 | 29 |
| Sur | 22 | 28 |
| Oeste | 21 | 28 |
| d) Partes transparentes | | |
| Tragaluz y domo | 19 | |
| Ventana Norte | 21 | |
| Ventana Este | 21 | |
| Ventana Sur | 21 | |
| Ventana Oeste | 21 | |

2.3. Coeficiente de transferencia de calor "K" del edificio de referencia (W/m²K)

| | |
|-----------------|-------|
| Techo | 0.833 |
| Tragaluz y domo | 5.952 |
| Muro | 0.833 |
| Ventana | 5.319 |

2.4. Factor de ganancia de calor solar "FG" (W/m²K)

| | |
|-----------------|-----|
| Tragaluz y domo | 274 |
| Norte | 91 |
| Este | 137 |
| Sur | 118 |
| Oeste | 146 |

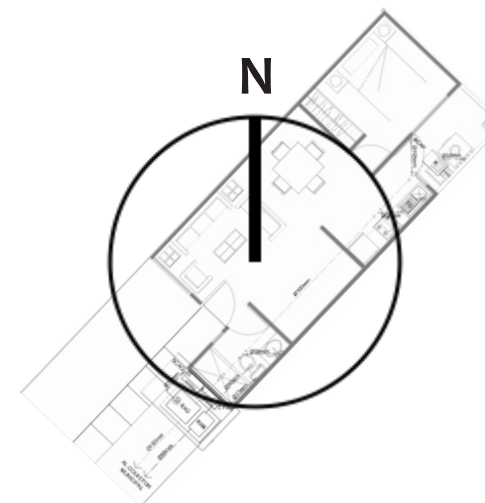
2.5. Barrera para vapor

| | |
|----|---|
| SI | x |
| NO | |

2.6. Factor de corrección de sombreado exterior (SE)

| | | |
|------------|---|---|
| Número | 1 | 2 |
| L/H o P/E | 0 | 0 |
| W/H o W/E | 0 | 0 |
| Norte | 0 | 0 |
| Este/Oeste | 0 | 0 |
| Sur | 0 | 0 |

Orientación de vivienda tipo elegida



3. Cálculo del Coeficiente Global de Transferencia de Calor de las porciones de la Envolvente

| | | | |
|-----|-----------------------------|-------------------------|---|
| 3.1 | Descripción de la porción | Losa de concreto armado | 1 |
| | Componente de la envolvente | Techo | |

| Material | Espesor (m) | Conductividad térmica (w/mK) | Aislamiento térmico |
|--|-------------|------------------------------|---------------------|
| Convección exterior | 1.000 | 13.000 | 0.077 |
| Impermeabilizante | 0.004 | 0.170 | 0.024 |
| Concreto armado | 0.100 | 1.740 | 0.057 |
| Yeso interior | 0.020 | 0.372 | 0.054 |
| Convección interior | 1.000 | 9.400 | 0.106 |
| Aislamiento térmico (M)=ΣM (m²K/W) | | | 0.3181 |
| Coeficiente global de transferencia de calor (K)=1/M (W/m²K) | | | 3.1440 |

| | | | |
|-----|-----------------------------|--------|---|
| 3.2 | Descripción de la porción | Puerta | 2 |
| | Componente de la envolvente | Pared | |

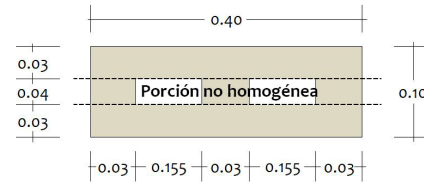
| Material | Espesor (m) | Conductividad térmica (w/mK) | Aislamiento térmico |
|--|-------------|------------------------------|---------------------|
| Convección exterior | 1.000 | 13.000 | 0.077 |
| Madera | 0.036 | 0.130 | 0.277 |
| Convección interior | 1.000 | 8.100 | 0.123 |
| Aislamiento térmico (M)=ΣM (m²K/W) | | | 0.477 |
| Coeficiente global de transferencia de calor (K)=1/M (W/m²K) | | | 2.095 |

| | | | |
|-----|-----------------------------|---------|---|
| 3.3 | Descripción de la porción | Ventana | 3 |
| | Componente de la envolvente | Pared | |

| Material | Espesor (m) | Conductividad térmica (w/mK) | Aislamiento térmico |
|--|-------------|------------------------------|---------------------|
| Convección exterior | 1.000 | 13.000 | 0.077 |
| Vidrio sencillo | 0.003 | 0.930 | 0.003 |
| Convección interior | 1.000 | 8.100 | 0.123 |
| Aislamiento térmico (M)=ΣM (m²K/W) | | | 0.204 |
| Coeficiente global de transferencia de calor (K)=1/M (W/m²K) | | | 4.911 |

| | | | |
|------|--|-------|---|
| 3.4. | Descripción de la Porción No Homogénea | Muro | 4 |
| | Componente de la envolvente | Pared | |

| | |
|---|------------------|
| Área de la componente en m² (A) | 0.016=0.040X.040 |
| Área que ocupa la componente no homogénea (1) | 0.0124 |
| Fracción de la combinación (F1) (b) | 0.775 |
| Área que ocupa la componente no homogénea (2) | 0.0036 |
| Fracción de la combinación (F2) | 0.225 |



Aislamiento térmico parcial:

| Material | Espesor (m) | Conductividad térmica (w/mK) | Aislamiento térmico |
|---------------------|-------------|------------------------------|---------------------|
| Convección exterior | 1.000 | 13.000 | 0.077 |
| Mortero de cal | 0.020 | 0.872 | 0.023 |
| Block Hueco | 0.060 | 0.238 | 0.252 |
| Yeso | 0.020 | 0.372 | 0.054 |
| Convección interior | 1.000 | 8.100 | 0.123 |
| Mparcial=ΣM (m²K/W) | | | 0.529 |

| Fracción (F) | Material | Grueso (m) | Cond. térmica (w/mK) | g | $\frac{F_i}{M_{parcial} + (g / \lambda_m)}$ |
|--------------|-------------|------------|----------------------|-------|---|
| F1 | Block hueco | 0.04 | 0.238 | 0.168 | 1.112 |
| F2 | Aire | 0.04 | 0.024 | 1.667 | 0.102 |
| Suma | | | | | 1.214 |

$$M = \frac{1}{\frac{F_1}{M_{parcial} + (g / \lambda_1)} + \frac{F_2}{M_{parcial} + (g / \lambda_2)} + \dots + \frac{F_n}{M_{parcial} + (g / \lambda_m)}} = 0.8237$$

$$K = 1/M (W/m^2K) = 1.2140$$

4. Cálculo Comparativo de la Ganancia de Calor

Temperatura Interior (t) 23 °C

4.1 Edificio de referencia

4.1.1. Ganancias por conducción (partes opacas y transparentes)

$$\phi_{pci} = \sum_{j=1}^n [K_j \times A_{ij} \times (t_{ei} - t)]$$

| Tipo y orientación de la porción de la envolvente | Coefficiente Global de Transferencia de Calor, (W/m²K) | Area del edificio proyectado (m²) | Fracción de la componente | Temperatura equivalente | Temperatura Interior | Ganancia por Conducción (Φ rc) |
|---|--|-----------------------------------|---------------------------|-------------------------|----------------------|--------------------------------|
| | [K] | [A] | [F] | [te] | [t] | [K*A*F*(te-t)] |
| Techo | 0.833 | | 1.00 | 32 | 23 | 299.13 |
| Tragaluz y domo | 5.952 | 39.90 | 0.00 | 19 | 23 | 0.00 |
| Muro Norte | 0.833 | 26.07 | 0.90 | 20 | 23 | -58.63 |
| Ventana Norte | 5.319 | | 0.10 | 21 | 23 | -27.73 |
| Muro este | 0.833 | 10.80 | 0.90 | 22 | 23 | -8.10 |
| Ventana este | 5.319 | | 0.10 | 21 | 23 | -11.49 |
| Muro sur | 0.833 | 25.82 | 0.90 | 22 | 23 | -19.36 |
| Ventana Sur | 5.319 | | 0.10 | 21 | 23 | -27.47 |
| Muro oeste | 0.833 | 10.80 | 0.90 | 21 | 23 | -16.19 |
| Ventana oeste | 5.319 | | 0.10 | 21 | 23 | -11.49 |
| Superficie inferior | 0.833 | 0.00 | 1.00 | 23 | 23 | 0.00 |
| Σ Φ rc | | | | | | 118.67 |

* Nota: Si los valores son negativos significa una bonificación, por lo que deben sumarse algebraicamente

4.1.2. Ganancias por radiación (partes transparentes)

$$\phi_{psi} = \sum_{j=1}^m [A_{ij} \times CS_j \times FG_i \times SE_{ij}]$$

| Tipo y orientación de la porción de la envolvente | Coefficiente de Sombreado (CS) | Area del edificio proyectado (m²) | Fracción de la componente | Ganancia de Calor (W/m²) | Ganancia por Radiación (Φ rs) |
|---|--------------------------------|-----------------------------------|---------------------------|--------------------------|-------------------------------|
| | | [A] | [F] | [FG] | [CS*A*F*FG] |
| Tragaluz y domo | 1.00 | 0 | 0 | 274 | 0 |
| Ventana norte | 1.00 | 26.1 | 0.1 | 91 | 237.237 |
| Ventana este | 1.00 | 10.8 | 0.1 | 137 | 147.96 |
| Ventana sur | 1.00 | 25.82 | 0.1 | 118 | 304.676 |
| Ventana oeste | 1.00 | 10.8 | 0.1 | 146 | 157.68 |
| Σ Φ rs | | | | | 847.553 |

4.2 Edificio proyectado

4.2.1. Ganancias por conducción (partes opacas y transparentes)

| Tipo y orientación de la porción de la envolvente | N° de porción | Coefficiente Global de Transferencia de Calor, valor calculado (W/m ² K) | Area del edificio proyectado (m ²) | Temp. Equivalente (°C) | Temp. Interior (°C) | Ganancia por Conducción (Φ pc) |
|---|---------------|---|--|------------------------|---------------------|--------------------------------|
| | | [K] | [A] | [te] | [t] | [K*A*(te-t)] |
| Techo | 1 | 3.1440 | 39.9 | 32 | 23 | 1,128.99 |
| Domo | | | | | | |
| Muro norte | 4 | 1.2140 | 25.82 | 20 | 23 | -94.035 |
| Ventana norte | 3 | 4.9115 | 0.25 | 21 | 23 | -2.456 |
| Muro este | 4 | 1.2140 | 8.90 | 22 | 23 | -10.804 |
| Ventana este | 3 | 4.9115 | 0.43 | 21 | 23 | -4.224 |
| Puerta este | 2 | 2.095 | 1.47 | 29 | 23 | 18.479 |
| Muro sur | 4 | 1.2140 | 24.62 | 22 | 23 | -29.888 |
| Ventana sur | 3 | 4.911 | 1.20 | 21 | 23 | -11.787 |
| Muro oeste | 4 | 1.2140 | 7.13 | 21 | 23 | -17.311 |
| Ventana oeste | 3 | 4.911 | 1.78 | 21 | 23 | -17.485 |
| Puerta oeste | 2 | 2.095 | 1.89 | 28 | 23 | 19.799 |
| Superficie inferior | | | | | | |
| Σ Φ pc | | | | | | 979.283 |

4.2.2. Ganancias por radiación (partes transparentes)

| Tipo y orientación de la porción de la envolvente | Material | Coeficiente de Sombreado (CS) | Area (m ²) | Ganancia de Calor (W/m ²) | Factor de sombreado ext. [SE] | | Ganancia por Radiación (Φ ps) |
|---|-----------------|-------------------------------|------------------------|---------------------------------------|-------------------------------|-------|-------------------------------|
| | | | [A] | [FG] | Numero | Valor | [CS*A*F*FG] |
| Ventana Norte | Vidrio sencillo | 0.6 | 0.25 | 91 | 1 | 1 | 13.65 |
| Ventana Este | Vidrio sencillo | 0.6 | 0.43 | 137 | 1 | 1 | 35.346 |
| Ventana Sur | Vidrio sencillo | 0.6 | 1.20 | 118 | 1 | 1 | 84.96 |
| Ventana Oeste | Vidrio sencillo | 0.6 | 1.78 | 146 | 1 | 1 | 155.928 |
| Domo | | | | | | | |
| Σ Φ ps | | | | | | | 289.884 |

5. Resumen del Cálculo

| 5.1. Presupuesto Energético | | Ganancia Total | | | | |
|-----------------------------|---------------|-------------------------|------------------------|------------------------------|------------------------------|----------|
| | | Ganancia por Conducción | Ganancia por Radiación | $\Phi r = \Phi rc + \Phi rs$ | $\Phi p = \Phi pc + \Phi ps$ | |
| Referencia | (Φrc) | 118.67 | (Φrs) | 847.55 | (Φr) | 966.22 |
| Proyectado | (Φpc) | 979.28 | (Φps) | 289.88 | (Φp) | 1,269.17 |

| | | | |
|-------------------|--------------------------|--------------------------|---------|
| 5.2. Cumplimiento | Si ($\Phi r > \Phi p$) | No ($\Phi r < \Phi p$) | -23.87% |
|-------------------|--------------------------|--------------------------|---------|

La vivienda no cumple con la norma ya que la ganancia de calor del edificio proyectado es mayor que la ganancia del edificio de referencia

CÁLCULO CONSIDERANDO EL VERDEM EN LA FACHADA

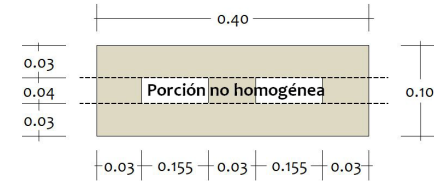
Nota: Los incisos repetidos o agregados en este cálculo muestran las modificaciones realizadas para incluir el VERDEM en la fachada de la vivienda. Los demás incisos fueron considerados con los mismos datos para llevar a cabo los cálculos requeridos.

1. Descripción del Edificio a Evaluar

1.1 Dimensiones Generales

| | |
|---------------------|-------|
| Niveles | 1 |
| Techo | 39.90 |
| Domo | - |
| Muro norte | 25.82 |
| Ventana Norte | 0.25 |
| Puerta Norte | - |
| Muro este | 8.90 |
| Ventana este | 0.43 |
| Puerta este | 1.47 |
| Muro sur | 24.62 |
| Ventana sur | 1.20 |
| Puerta sur | - |
| Muro oeste | 4.73 |
| Muro oeste (VERDEM) | 2.40 |
| Ventana oeste | 1.78 |
| Puerta oeste | 1.89 |
| Superficie inf | - |

| | | |
|---|-------|------------------|
| 3.5. Descripción de la Porción No Homogénea | Muro | 5 |
| Componente de la envolvente | Pared | |
| Área de la componente en m2 (A) | | 0.016=0.040X.040 |
| Área que ocupa la componente no homogénea (1) | | 0.0124 |
| Fracción de la combinación (F1) (b) | | 0.775 |
| Área que ocupa la componente no homogénea (2) | | 0.0036 |
| Fracción de la combinación (F2) | | 0.225 |

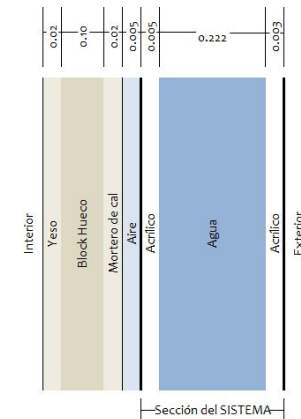


Aislamiento térmico parcial:

| Material | Espesor (m) | Conductividad térmica (w/mK) | Aislamiento térmico |
|---------------------|-------------|------------------------------|---------------------|
| Convección exterior | 1.000 | 13.000 | 0.077 |
| Acrílico | 0.003 | 0.180 | 0.017 |
| Agua* | 0.222 | 0.580 | 0.383 |
| Acrílico | 0.005 | 0.180 | 0.028 |
| Aire | 0.005 | 0.024 | 0.208 |
| Mortero de cal | 0.020 | 0.872 | 0.023 |
| Block Hueco | 0.060 | 0.238 | 0.252 |
| Yeso | 0.020 | 0.372 | 0.054 |
| Convección interior | 1.000 | 8.100 | 0.123 |

*Se tomó la conductividad térmica del agua en vez del sustrato ya que es el que mayor volumen ocupa dentro del humedal

$M_{parcial} = \sum M \text{ (m}^2\text{K/W)}$ 1.165



El ancho de la sección del VERDEM fué homogenizado para llevar a cabo los cálculos de los componentes de la envolvente.

| Fracción (F) | Material | Grueso (m) | Cond. térmica (w/mK) | g | $\frac{F_i}{M_{parcial} + (g / \lambda_m)}$ |
|--------------|-------------|------------|----------------------|-------|---|
| F1 | Block hueco | 0.040 | 0.238 | 0.168 | 0.581 |
| F2 | Aire | 0.040 | 0.024 | 1.667 | 0.079 |
| Suma | | | | | 0.661 |

$$M = \frac{1}{\frac{F_1}{M_{parcial} + (g / \lambda_1)} + \frac{F_2}{M_{parcial} + (g / \lambda_2)} + \dots + \frac{F_n}{M_{parcial} + (g / \lambda_n)}} = 1.5130$$

$$K = 1/M \text{ (W/m}^2\text{K)} = 0.6610$$

4.2 Edificio proyectado

4.2.1. Ganancias por conducción (partes opacas y transparentes)

| Tipo y orientación de la porción de la envolvente | Nº de porción | Coefficiente Global de Transferencia de Calor, valor calculado (W/m²K) | Area del edificio proyectado (m²) | Temp. Equivalente (°C) | Temp. Interior (°C) | Ganancia por Conducción (Φ pc) |
|---|---------------|--|-----------------------------------|------------------------|---------------------|--------------------------------|
| | | [K] | [A] | [te] | [t] | [K*A*(te-t)] |
| Techo | 1 | 3.1440 | 39.9 | 32 | 23 | 1,128.996 |
| Domo | | | | | | |
| Muro norte | 4 | 1.2140 | 25.82 | 20 | 23 | -94.035 |
| Ventana norte | 3 | 4.911 | 0.25 | 21 | 23 | -2.456 |
| Muro este | 4 | 1.2140 | 8.90 | 22 | 23 | -10.804 |
| Ventana este | 3 | 4.911 | 0.43 | 21 | 23 | -4.224 |
| Puerta este | 2 | 2.095 | 1.47 | 29 | 23 | 18.479 |
| Muro sur | 4 | 1.2140 | 24.62 | 22 | 23 | -29.888 |
| Ventana sur | 3 | 4.911 | 1.20 | 21 | 23 | -11.787 |
| Muro oeste | 4 | 1.2140 | 4.73 | 21 | 23 | -11.484 |
| Muro oeste (VERDEM) | 5 | 0.660 | 2.40 | 21 | 23 | -3.173 |
| Ventana oeste | 3 | 4.911 | 1.78 | 21 | 23 | -17.485 |
| Puerta oeste | 2 | 2.095 | 1.89 | 28 | 23 | 19.799 |
| Superficie inferior | | | | | | |
| $\Sigma \Phi_{pc}$ | | | | | | 981.938 |

5. Resumen del Cálculo

| 5.1. Presupuesto Energético | | | | | | Ganancia Total |
|-----------------------------|-----------------|----------------------------|-----------------|---------------------------|--------------|----------------------------------|
| | | Ganancia por Conducción | | Ganancia por Radiación | | $\Phi_r = \Phi_{rc} + \Phi_{rs}$ |
| | | | | | | $\Phi_p = \Phi_{pc} + \Phi_{ps}$ |
| Referencia | (Φ_{rc}) | 118.67 | (Φ_{rs}) | 847.55 | (Φ_r) | 966.22 |
| Proyectado | (Φ_{pc}) | 981.94 | (Φ_{ps}) | 289.88 | (Φ_p) | 1,271.82 |

| | | | | |
|-------------------|--------------------------|--------------------------|--|---------|
| 5.2. Cumplimiento | Si ($\Phi_r > \Phi_p$) | No ($\Phi_r < \Phi_p$) | | -24.03% |
|-------------------|--------------------------|--------------------------|--|---------|

