



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA

CARRERA DE BIOLOGÍA

**Tratamiento y reutilización de aguas grises en humedal
artificial dentro de invernadero en Iztapalapa, México
Distrito Federal**

T E S I S

PARA OBTENER EL TÍTULO DE

BIÓLOGO

PRESENTA

MICHEL OZALDE ALDAY

DIRECTOR

M. EN C. ELISEO CANTELLANO DE ROSAS



CIUDAD DE MÉXICO

FEBRERO DE 2016

Se agradece el apoyo de la DGPA-UNAM, proyecto
PAPIME PE203514, para la realización de la tesis.



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.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco con sensatez a la Universidad Nacional Autónoma de México por darme el privilegio de llenarme de sabiduría entre la magnificencia de sus instalaciones, con todo el corazón y sin titubear he de mencionar con orgullo ser universitario de sangre azul y oro.

Mi profundo agradecimiento a la Facultad de Estudios Superiores Zaragoza como institución, a la que tuve el placer de representar como estudiante y deportista. Por siempre defenderé el escudo de mi facultad.

Al M. en C. Eliseo Cantellano de Rosas que fue mi guía desde mi etapa como estudiante y hasta el día de mi titulación. ¡Gracias por todo amigo mío!

Agradezco de todo corazón al biólogo y coach del equipo varonil de baloncesto de la Facultad de Estudios Superiores Zaragoza Salvador López Sandoval por todas sus enseñanzas y por haber forjado disciplina, coraje y un gran espíritu de competencia en mí.

A la bióloga Maricela Arteaga Mejía, el M. en P.P. León Estebanjuan Alejo, el M. en C. Ramiro Ríos Gómez y el Dr. Eloy Solano Camacho por ser excelentes profesores y por haber aceptado con gusto ser mis sinodales, de la manera más humilde agradezco sus valiosas observaciones y la sabiduría que han depositado en mí ser.

DEDICATORIAS

Para mi amada Ximena Cortés Coronel a la que admiro como profesionalista y que ha sido fiel testigo de esta etapa, dándome ánimo y motivación, alegrías y molestias, pero sobre todo su amor y su compañía. Te amo con toda el alma mi eterna compañera.

A mi señora abuela Selmi Adriana Osalde que con mano dura y grandes consejos supo enseñarme el valor de las cosas y que nunca hay que rendirse ante nada ni nadie. Te amo abuela.

José Osalde mi gran amigo, cómplice y maestro. En cada etapa de mi vida siempre estuviste para apoyarme con todo el amor del mundo ¡Gracias tío!

A mis hermanas Hizel, Jennifer y mi pequeña Viri les dedico todo mi esfuerzo, cada gota de sudor y cada lagrima que derramamos valieron la pena hermanas, las amo.

A mis padres Adriana Alday y Antonio Osalde gracias por su comprensión y toda la confianza que depositaron en mí. Supe entenderlos, siempre respetarlos y amarlos.

A la gran señora Alicia Coronel y honorable señor Juan Rubín que me apoyaron de manera incondicional durante este proceso.

CONTENIDO

RESUMEN	1
I. INTRODUCCIÓN	2
II. MARCO TEÓRICO.....	4
II.1 AGUAS RESIDUALES.....	4
II.2 MARCO NORMATIVO EN MATERIA DE AGUA RESIDUAL	6
II.3 PROCESOS DE TRATAMIENTO PARA LAS AGUAS RESIDUALES.....	9
II.4 LOS HUMEDALES ARTIFICIALES.....	15
II.5 REUTILIZACIÓN DEL AGUA EN MÉXICO.....	18
III. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	24
IV. JUSTIFICACIÓN.....	25
V. ÁREA DE ESTUDIO	26
VI. OBJETIVOS:.....	28
VII. MÉTODOS.....	28
VII.1 GABINETE.....	28
VII.2 CAMPO	28
VII.3 LABORATORIO.....	33
VIII. RESULTADOS.....	35
VIII. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	41
CALIDAD DEL AGUA	41
CALIDAD DEL SUELO	55
CRECIMIENTO VEGETAL	57
IX CONCLUSIONES	61
X RECOMENDACIONES.....	61
LITERATURA CITADA.....	62
ANEXOS	70

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema general de la oxidación biológica (Jarabo et al 2000)	10
Figura 2. Esquema tridimensional del proceso de lodos activos.....	11
Figura 3. Esquema general del tratamiento de lodos activos.....	11
Figura 4. Tratamiento de las aguas residuales por estados a nivel nacional ...	13
Figura 5. Distribución de las plantas de agua residual, tratamiento preponderante y reutilización post tratamiento (CONAGUA, 2015).	14
Figura 6. Croquis de la vivienda que cuenta con el sistema de aprovechamiento de aguas grises (Romero 2009).....	20
Figura 7. Parámetros estandarizados para determinar la calidad del agua.	21
Figura 8. Tipos de invernaderos (SAGARPA 2014).	22
Figura 9. Imagen satelital de la unidad habitacional “Ex lienzo charro” ubicada en Av. Manuel Escandón No 64 en la colonia Álvaro Obregón de la delegación Iztapalapa. Fuente: Google Earth Inc.....	26
Figura 10. Primera fase de la construcción del invernadero rústico	29
Figura 11. Segunda fase de la construcción del invernadero rústico	29
Figura 12. Construcción del filtro de arenas y gravas (Anexo 4).....	30
Figura 13. Desviación del agua grises al sistema de tratamiento (Anexo 4)	30
Figura 14. Construcción del humedal artificial dentro del invernadero	31
Figura 15. Adaptación de la bomba para el sistema de riego	31
Figura 16. Etapas de siembra dentro del invernadero.....	32
Figura 17. Muestra del influente y el efluente y equipo multiparámetro OAKTON	33
Figura 18. Determinación de la calidad del agua con equipo HACH DR/890..	34
Figura 19. Análisis de sustrato irrigado y no irrigado.....	35
Figura 20. Comportamiento del pH durante los 6 meses de muestreo	41
Figura 21. Comportamiento del O.D. en el sistema de tratamiento.....	42
Figura 22. Diagrama de caja del O.D. en el sistema de tratamiento.	43
Figura 23. Comportamiento de la temperatura durante los 6 meses de muestreo	43
Figura 24. Comportamiento de la Dureza durante el tratamiento del agua gris	44
Figura 25. Diagrama de caja de la dureza en el sistema de tratamiento.....	45
Figura 26. Comportamiento del cloro durante los seis meses de muestreo.	46
Figura 27. Diagrama de caja de cloro en el sistema de tratamiento.....	46
Figura 28. Valores de la conductividad del sistema de tratamiento.....	47
Figura 29. Diagrama de caja de conductividad eléctrica en el sistema de tratamiento.	48
Figura 30. Concentraciones nitrógeno amoniacal	50
Figura 31. Concentraciones del NO_2^+	50
Figura 32. Concentraciones de los NO_3^-	50
Figura 33. Diagrama de caja del nitrógeno amoniacal.	51
Figura 34. Diagrama de caja de los nitratos.....	51

Figura 35. Concentraciones de ortofosfatos durante los seis meses de tratamiento.	52
Figura 36. Comportamiento de la DQO en el sistema de tratamiento.	53
Figura 37. Comportamiento de la DBO en el sistema de tratamiento.	54
Figura 38. Valores de los parámetros de la calidad del sustrato no irrigado con el agua del efluente.	56
Figura 39. Valores de los parámetros de la calidad del sustrato irrigado.	56
Figura 40. Registro fotográfico de <i>Cucurbita pepo</i> .en diferentes estadios fenológicos	57
Figura 41. Registro fotográfico de <i>Lactuca sativa</i> .en diferentes estadios fenológicos	58
Figura 42. Registro fotográfico de <i>Lycopersicon esculatum cv Naomi F1</i> . En diferentes estadios fenológicos	59
Figura 43. Establecimiento de las plantas del humedal, derecha. <i>Zantedechia Aethiopica</i> , izquierda <i>Anthurium andreanu</i>	60

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Resultados analíticos de la calidad del agua del influente.....	36
Cuadro 2. Resultados analíticos de la calidad del agua del influente.....	36
Cuadro 3. Valores máximos, mínimos y media de los parámetros analizados para calidad del agua del influente.....	37
Cuadro 4. . Valores máximos, mínimos y media de los parámetros analizados para calidad del agua del efluente.....	38
Cuadro 5. Concentraciones de carbonatos, bicarbonatos y cloruros.	38
Cuadro 6. Análisis de varianza de la calidad del agua de los parámetros del sistema de tratamiento	39
Cuadro 7. Datos del crecimiento de la especie <i>Cucúrbita pepo</i>	40
Cuadro 8. Datos del crecimiento de la especie <i>Lycopersicon esculatum c.v. Naomi f1</i>	40
Cuadro 9. Datos del crecimiento de la especie <i>Lactuca sativa</i>	40
Cuadro 10. Análisis de varianza de dureza	44
Cuadro 11. Resultados de análisis de varianza de conductividad.....	47
Cuadro 12. Valores de F y críticos de F para nitritos y nitratos	50
Cuadro 13. Análisis de varianza de las concentraciones de ortofosfatos del influente y efluente	52
Cuadro 14. Escala de clasificación de la DQO, fuente CONAGUA 2015.....	53
Cuadro 15. Escala de clasificación de la DBO, fuente CONAGUA 2015.	54

RESUMEN

Las aguas residuales representan un problema ambiental y de salud pública. Sin embargo, las aguas grises son una alternativa frecuente para el riego de vegetales; no obstante es necesario estudiar y validar las posibilidades de tratamiento y reutilización.

Existen distintas formas para tratar las aguas residuales, entre ellas destacan los sistemas convencionales de lodos activados. La problemática radica en el alto costo de su instalación, operación y mantenimiento, por lo que resulta complicado establecerlo en poblaciones humanas con escasos recursos económicos. Existen actualmente alternativas que pueden mitigar este problema, tal es el caso del uso de humedales artificiales, sin embargo, es necesario demostrar su viabilidad en cuanto a diseño, operación y efectividad para pequeños núcleos urbanos.

En el presente estudio se realizaron las adecuaciones en la infraestructura de una vivienda ubicada en un complejo habitacional en Iztapalapa, Distrito Federal, para desviar el flujo de agua gris de los lavamanos y otros generadores. El sistema consta de un filtro de arenas y gravas como tratamiento primario, seguido de un humedal de flujo subsuperficial horizontal con plantas de *Anthurium andreanum* y *Zantedechia aethiopica*, como tratamiento secundario, bajo un invernadero como medio de estabilización climática para garantizar el desarrollo de dichas especies, así como el cultivo de *Cucurbita pepo*, *Lactuca sativa* y *Lycopersicon esculentum*. La evaluación de la calidad del agua contempló la determinación de los principales indicadores físicos, químicos y biológicos de acuerdo a las técnicas estandarizadas en las Normas Oficiales Mexicanas y el Manual HACH, así como también el análisis de carbonatos, bicarbonatos y cloruros, presentes en el sustrato que recibe el agua del efluente, de acuerdo con la norma NOM-021-SEMARNAT-2000. El sistema de tratamiento demostró tener mayor éxito de remoción de los compuestos nitrogenados como NO₂- y NO₃- registrando un promedio de 63% y 47% de remoción, respectivamente. En general, el efluente cumple con la NOM-003-SEMARNAT- 1997 y puede ser reutilizado al público con contacto directo.

I INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso vital para la vida y soporte del desarrollo económico y social de cualquier país del mundo, fundamental para los ecosistemas y requisito para la sustentabilidad del medio ambiente y su biodiversidad. La distribución natural del agua en el ámbito mundial y regional es desigual mientras en algunas regiones es abundante, en otras es escasa o inexistente (INEGI, 2006)

El Valle de México tiene una extensión de 9600 km² y se ubica a 2240 msnm. Originalmente era una cuenca cerrada, la cual fue artificialmente abierta a finales del siglo XVII para evitar inundaciones. En él, se asienta la zona urbana más grande del país, con 18 millones de habitantes, además concentra gran parte de la actividad industrial, comercial y política del país (Jiménez *et al.*, 2008).

En la Ciudad de México, 80% del agua se emplea para fines municipales, 5% para la industria y 15% para riego. En otras palabras, el “usuario principal” son los habitantes. A partir de esta agua se genera en promedio anual 45 m³/s de aguas residuales (Jiménez *et al.*, 2008). La mancha urbana ha crecido de manera exponencial, abarcando la mayor parte del territorio de las delegaciones del Distrito Federal (INEGI, 2012), que aunado a la falta de cultura sobre el cuidado, manejo y reutilización de los recursos hídricos y de las áreas verdes, ha mermado la calidad de vida de los habitantes de esta ciudad (Alcocer 1995 & Alcacer *et al.*, 2012).

Para el año 2013, el Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI, 2013) revela que la disponibilidad natural media de agua por habitante del Distrito Federal, es de 4505 m³, resaltando que el desperdicio, la falta de pago por el servicio, la contaminación del recurso, su inadecuada utilización, deficiente administración y la casi nula preocupación por su reutilización ha dado lugar a que a nivel nacional México se encuentra entre los países con una disponibilidad de agua promedio baja, ubicándose en el lugar 81 a nivel mundial (Metcalf, 2004).

Las condiciones socioeconómicas que actualmente se proyectan en la mayor parte de las delegaciones del Distrito Federal, sobre todo en las más grandes y las más pobladas, han determinado que las viviendas sean de tamaño reducido, con poco el acceso a áreas verdes. La calidad de servicios hídricos se deteriora y empeoran con el paso del tiempo, ocasionando estrés y un impacto negativo directo en la calidad de vida de los habitantes (Mantallana & Montero, 1995; Palacios-Blanco, 2011; SAGARPA, 2014).

Un ejemplo puntual de este conflicto son los complejos habitacionales ubicados en la delegación Iztapalapa, donde la demanda del recurso hídrico es muy alta y el servicio es deficiente; además, la superficie destinada a áreas verdes son remplazados por pavimento e instalaciones alejadas de su finalidad original, limitando el emprendimiento de técnicas de mejoramiento del medio ambiente (CONAGUA, 2010).

Sin embargo, los humedales artificiales representan una alternativa para los problemas que encaran los países con economías emergentes como México, desde el punto de vista económico y tecnológico (Haro, 2004). Estos humedales son sistemas de tratamiento en los que, a través de procesos físicos, químicos y biológicos, se logra la remoción de contaminantes presentes en las aguas residuales, pudiéndose reutilizar una vez tratadas para uso agrícola o industrial (Guido y Durán, 2008). El primer sistema construido de humedales se puso en operación en Alemania en 1974; desde entonces, estos sistemas se han utilizado en casi todo el mundo como una alternativa para la remoción de contaminantes del agua debido a su alta efectividad y bajo costo (Haro y Aponte, 2010).

La composición de las aguas grises dependen de la instalación de donde provenga (Eriksson *et al.*, 2002). En general las agua grises contienen bajos niveles de materia orgánica y nutrimentos, comparadas con las aguas negras que comúnmente son desechadas.

Por ello, el propósito de este trabajo consistió en implementar un sistema de tratamiento para aguas grises o jabonosas provenientes de lavabos, fregaderos, lavaderos, regaderas y lavadoras, que consta de un filtro de gravas y arenas, así como un humedal horizontal de flujo subsuperficial, en un departamento ubicado dentro de un fraccionamiento de la delegación Iztapalapa. En consecuencia, se estableció un invernadero rústico que ayudara evaluar el uso de agua gris. Esto es relevante porque se tienen registros donde se demuestra que el agua gris sin un tratamiento previo contribuye con la salinización del suelo (Chenowethy Pedley, 2014). Aún así, las aguas grises tratadas se han convertido en una frecuente y eficaz alternativa para el riego de vegetales (Paulo *et al.*, 2007; Barker *et al.*, 2009). De esta manera, la construcción del sistema de reutilización podría contribuir a la difusión de información sobre alternativas que benefician al medio ambiente y mejoran la calidad de vida en zonas urbanas altamente pobladas.

II. MARCO TEÓRICO

II.1 AGUAS RESIDUALES

Las aguas residuales son aquellas cuya composición es variada y provienen de las descargas de usos municipales, industriales, comerciales, de servicios, agrícolas, pecuarios, domésticos, incluyendo fraccionamientos y en general de cualquier otro uso, así como la mezcla de ellas (NOM-002-SEMARNAT-1996).

Las aguas residuales tienen su origen en: arrastres de lluvia, excretas, infiltraciones, residuos domésticos e industriales (NOM-002- SEMARNAT-1996). Los arrastres de agua son todas aquellas partículas que acompañan a las aguas pluviales durante su recorrido en las calles hasta el alcantarillado público como sólidos suspendidos, partículas sólidas, hidrocarburos de las vías públicas, entre otros. Las excretas son residuos sólidos y líquidos que provienen fundamentalmente de las heces humanas, además de la orina, que contiene compuestos como la urea, aminoácidos, glúcidos algunos aniones como sulfatos y fosfatos y cationes como el sodio, el potasio, el amonio y el calcio. La fase sólida de las excretas contiene cisteína, que produce ácido sulfhídrico (H_2S) y mercaptanos. (Seoanez, 1999b). Por otra parte los residuos domésticos son generados en los lugares destinados para el preparado de comida, lavado de utensilios y limpieza de habitaciones. En general son las provenientes del uso particular de las personas y del hogar denominadas aguas grises (NOM-002-SEMARNAT- 1996) y los residuos industriales que son adicionados a las aguas residuales, tienen origen muy variado, ya que dependen del giro de la empresa, por ejemplo, para la industria textil la contaminación es química? (colorantes), y física (potencial de hidrógeno y térmica); para la galvanoplastia es física (metales, potencial de hidrógeno y térmica); para el ramo alimenticio y bebidas su problemática es orgánica (grasas y aceites y demanda bioquímica de oxígeno), finalmente las infiltraciones son ocasionadas por la composición del suelo, de manera particular la textura del suelo permite esta infiltración; hasta que la capacidad de campo del suelo es rebasada (por lo general 300 litros de agua por metro cúbico de suelo), se inicia la percolación (Fabeles y Hoogesteijn, 2010).

CARACTERIZACIÓN DEL AGUA RESIDUAL

La caracterización del agua residual depende principalmente de su origen y de sus componentes, (Jarabo *et al.*, 2000) por ejemplo, las aguas residuales se clasifican en municipales e industriales. Las primeras corresponden a las que se manejan en los sistemas de alcantarillado municipales, urbanos y rurales, contienen una gran variedad de organismos patógenos de origen humano (Llagas y Guadalupe, 2006). No obstante dentro de los tipos de agua residual derivados de las descargas domésticas, se encuentran las aguas grises o aguas jabonosas que provienen principalmente de lavaderos, fregaderos y regaderas, estas descargas líquidas tienen menor concentración de patógenos en comparación con las llamadas aguas negras (Gabarro *et al.*, 2013; Eriksson *et al.*, 2002). En tanto que las industriales son aquellas que se descargan directamente a los cuerpos receptores de propiedad nacional, como es el caso de la industria autoabastecida (Llagas y Guadalupe 2006).

AGUAS GRISES

La composición de las aguas grises depende de las fuentes y las instalaciones desde donde se generan, por ejemplo, cocina, baño o lavandería. Los compuestos químicos que presentan proceden de productos utilizados en el hogar, cocinar, lavar y la tubería. En general, las aguas grises contienen niveles más bajos de materia orgánica y nutrientes en comparación con las aguas residuales ordinarias (Eriksson *et al.*, 2002), ya que la orina, las heces y el papel de aseo no están incluidos. Sin embargo, los niveles de metales pesados están en el mismo intervalo de concentración en comparación con las descargas restantes de un hogar convencional (Chenoweth y Pedley, 2014). La reutilización del agua gris varía según las costumbres de la comunidad, ciudad o incluso país (Karpiscak *et al.*, 1990), un hábito común en países europeos como Alemania, es utilizar las descargas de aguas grises como fluido primario para limpieza del inodoro (Eriksson *et al.*, 2002); dentro de la agricultura las aguas residuales en general juegan un papel de suma importancia, no obstante se ha comprobado que se requiere de un previo tratamiento para evitar la contaminación del suelo que se utiliza para la siembra, principalmente la salinización. Aún así, las aguas grises tratadas se han convertido en una frecuente alternativa para el riego de vegetales (Paulo *et al.*, 2007; Barker *et al.*, 2009).

LA CALIDAD DE AGUA GRIS

Uno de los factores determinantes para la salud pública y de los ecosistemas, es sin duda la calidad del agua que de manera notoria restringe la oferta de agua y su distribución potencial para los diferentes usos. En México los problemas de calidad del agua son severos y tienen un gran atraso en su atención. El monitoreo de la calidad del agua es un proceso que debe ser eficaz, regulado y actualizado. De la misma manera, la evaluación de la calidad del agua es indispensable para poder orientar esfuerzos que favorezcan su reutilización (Carabias, 2005). La normatividad de protección al capital natural exige información confiable, espacial y oportuna, que contribuya a detectar, monitorear y evaluar la magnitud de ocurrencia de los procesos de deterioro en forma rápida, concreta y eficiente, además de proponer alternativas que disminuyan su incidencia o para recuperar áreas perturbadas (LEGEEPA, 2011).

II.2 MARCO NORMATIVO EN MATERIA DE AGUA RESIDUAL EN MÉXICO

El manejo del agua en México se remonta desde la época prehispánica, en el área que ahora cubre la zona metropolitana de la ciudad de México, existía un sistema lacustre, de tal potencial que dio lugar a uno de los desarrollos más importantes del área mesoamericana. La cuenca abarcaba alrededor de 7000 km², de los cuales cerca de 1000 correspondían a lagos y pantanos, tres de esos lagos: Xaltocan, Zumpango y Texcoco, eran salobres, mientras que Chalco y Xochimilco eran de agua dulce (Vela, 2007).

La actual política en materia hídrica está fundamentada en la constitución política de 1917, desde entonces la regulación tiene casi 100 años, y define la competencia, derechos y obligaciones de todo aquel que haga uso del agua.

Al finalizar la Revolución Mexicana, la necesidad de aumentar la producción de alimento dio lugar al nacimiento de la Comisión Nacional de Irrigación y la promulgación del Acta de Irrigación en el año de 1926. La Ley de Aguas Propiedad de la Nación y su reglamento fueron expedidos en 1934 y 1936 respectivamente (Escalas, 2006).

En 1946 la Comisión Nacional de Irrigación se convierte en la Secretaría de Recursos Hidráulicos, aumentando la regulación del líquido vital por su elevada demanda. Con la extracción del agua del subsuelo en 1956 y 1958 se crea la Ley y el reglamento del aprovechamiento de aguas del subsuelo. (Flores, 2009).

En 1975 se edita el Plan Nacional Hidráulico (PNH), con el objetivo de planear la utilización del agua y disminuir la contaminación del agua y suelo. Para 1976 la Secretaría de Recursos Hidráulicos y la Secretaría de Agricultura se fusionan para formar la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos para resolver los problemas agrarios. Por las dificultades de la implementación del Plan Hidráulico éste se transforma en el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). (Flores, 2009).

La Ley federal de derechos, las cuotas para uso y aprovechamiento de las aguas nacionales, finalmente con el incremento de los problemas relacionados con el agua es incluida en 1982, para el año 1989 se crea la CONAGUA, como organismo descentralizado y en 1992 se promulga la Ley de Aguas Nacionales (LAN) y en 1994 su reglamento (CONAGUA, 2015).

La regulación del agua en nuestro país y la planeación de los recursos hídricos han procurado satisfacer la demanda de la sociedad y diferentes sectores económicos, por lo que los efectos de la sobreexplotación se percibieron a inicios de los años setenta, así como la contaminación de los mismos (Herrera *et al.*, 1989)

Para los Estados Unidos Mexicanos la regulación en materia hídrica inicia desde su Constitución, en donde establece que son propiedad de la nación las aguas de los mares territoriales en la extensión y términos que fije el derecho internacional; las aguas marinas interiores; las de las lagunas y esteros que se comuniquen permanentemente o intermitentemente con el mar (Artículo 27 de la Constitución Política de los Estado Unidos Mexicanos).

La competencia para la explotación, uso o aprovechamiento de las aguas nacionales incluyendo las residuales recae exclusivamente sobre las autoridades municipales. Así mismo se faculta a la Comisión Nacional de Aguas a determinar los parámetros que deberán de cumplir las aguas residuales para ser vertidas hacia los cuerpos de agua (Artículo 45 y 87 de la Ley de Aguas Nacionales 2015).

Las empresas como una fuente generadora de agua residual que vierten hacia el alcantarillado están obligadas a reunir las condiciones necesarias para prevenir la contaminación a cuerpos receptores, u ocasionar alguna interferencia en los procesos de depuración de las aguas, o alteraciones en el funcionamiento adecuado de los sistemas, además la capacidad hidráulica en los sistemas del alcantarillado (Artículo 122 de la Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente).

En materia de salud, se prohíbe la descarga del agua residual sin un previo tratamiento (Artículo 122 de la Ley General de Salud) hacia cuerpos de agua que se destinan para uso o consumo humano, esto con la finalidad de evitar cualquier riesgo para la salud pública.

NORMAS OFICIALES MEXICANAS ACTUALES PARA EL DISTRITO FEDERAL EN MATERIA DEL MANEJO DE AGUAS RESIDUALES

En el Distrito Federal, la Secretaría del Medio Ambiente del Distrito Federal tiene la facultad para vigilar que las descargas de aguas residuales cumplan con la normatividad vigente en cantidad y calidad. (Artículo 155 de la Ley Ambiental del Distrito Federal).

La regulación de la calidad de agua residual está fundamentada en la Norma Oficial Mexicana NOM-002-SEMARNAT-1996, donde se establecen los límites máximos permisibles de los contaminantes que se indican en esta Norma, debido que es de orden federal. En 1994 se llevó a cabo la elaboración de esta norma, hasta su actualización en 1996 donde se menciona un parámetro llamado conductividad, que es la expresión numérica del agua que depende de la concentración total de sustancias disueltas ionizadas en la misma y de la temperatura a la que se haga la medición (Romero, 1999). El valor de la conductividad era un estimativo rápido para obtener el contenido de sólidos disueltos.

La Norma Oficial Mexicana NOM-002-SEMARNAT-1996 como lo indica el preámbulo de la misma, tiene como objetivo controlar la contaminación de las aguas y bienes nacionales, así como proteger la infraestructura de dichos sistemas, y su aplicación de carácter nacional aplica solo a las descargas de aguas de fuentes fijas, dejando fuera las descargas de origen pluvial (lluvia), pero como es sabido las empresas en el Distrito Federal (y en todo México), no tiene o es muy escasa la separación de los descargas de aguas residuales por su origen por lo que esta adecuación para las empresas generaría un cambio radical en su disposición de la red interna de sus drenajes situación que muy pocos están dispuestos de llevar a cabo, para evitar que la contaminación del agua residual sea menor (Seoanez, 1999 a).

II.3 PROCESOS DE TRATAMIENTO PARA LAS AGUAS RESIDUALES

En la actualidad el saneamiento de las aguas residuales se lleva a cabo en obras de infraestructura hidráulica donde se aplican diversos procesos que pueden ser aislados o en conjunto, lo que permite obtener diferentes grados de tratamiento de las aguas residuales. En las plantas de tratamiento convencionales como las de lodos activados, se consume mucha energía en el proceso, por la necesidad de oxigenar el agua en una etapa del tratamiento haciéndolo no sustentable. Los procesos para tratar las aguas residuales se clasifican en función del tipo de tratamiento que reciben y principalmente son tres (Escamilla, 2007), los cuales se describen a continuación:

TRATAMIENTO PRIMARIO

El tratamiento primario permite remover los sólidos suspendidos y materia orgánica conocido comúnmente como materiales en suspensión. Esta remoción es llevada a cabo mediante operaciones físicas de separación comenzando por el que impide la entrada de materiales sólidos por medio de cribas y rejas, que retienen entre sus mallas todo material en suspensión o flotantes. Estos son retenidos y recogidos por procedimientos manuales o automáticos. La dilaceración es la maniobra de fragmentación y trituración de materiales sólidos, realizada en los aparatos llamados dilaceradores. El desarenado únicamente separa la arena y la grava de la corriente de agua residual, para evitar el desgaste de las bombas. La sedimentación consiste en separar una suspensión en dos fases; un fluido y un lodo (con una concentración elevada de materia sólida). Esto se logra disminuyendo la velocidad de la corriente de agua residual, hasta alcanzar un valor lo suficientemente bajo como para que los compuestos sólidos más densos se depositen en el fondo. La separación de grasas es la operación para retirar las grasas (no emulsionados) que flotan arrastradas por las corrientes de aguas residuales. Para ello se suelen utilizar tanques rectangulares de múltiples canales de gran longitud y de poca profundidad, con rasquetas superiores para separar las grasas sobrenadantes. La floculación consiste en la unión o aglutinación de las partículas suspendidas en un líquido para formar unos agregados conocidos como flóculos. Cuando se favorece el fenómeno de floculación por medio de agentes químicos se llama coagulación. Se utiliza esta operación para aglutinar partículas finas, causantes de turbidez, formando otros más grandes mucho más fácil de separarlos por sedimentación o filtración. La flotación se utiliza para separar sólidos o líquidos inmiscibles y de baja densidad, que se encuentra en suspensión en las aguas residuales. Como agente de flotación se utiliza el aire, que se inyecta en la parte inferior del almacenamiento de las aguas y forma en la parte superior una espuma fácilmente eliminable. La filtración se utiliza para eliminar los sólidos en

suspensión de pequeño tamaño y generalmente una opción complementaria de la coagulación y sedimentación. Los materiales más utilizados son la arena, la antracita y la tierra de diatomeas (Metcalf, 1991).

TRATAMIENTO SECUNDARIO

Este tratamiento se enfoca en los procesos de oxidación, estabilización o remoción de la materia putrescible en solución o estado coloidal existente en las aguas negras (López, 1990). También es el encargado de eliminar la materia orgánica biodegradable (cuantificada como DBO). Aún después del tratamiento primario se promueve la multiplicación de microorganismos capaces de asimilar la materia orgánica, transformándola en una masa insoluble fácilmente separable (fig. 1). Es decir, la materia orgánica es asimilada por los microorganismos en presencia de oxígeno y nutrientes para producir más microorganismos y productos finales como dióxido de carbono y agua (Espinoza, 2004).

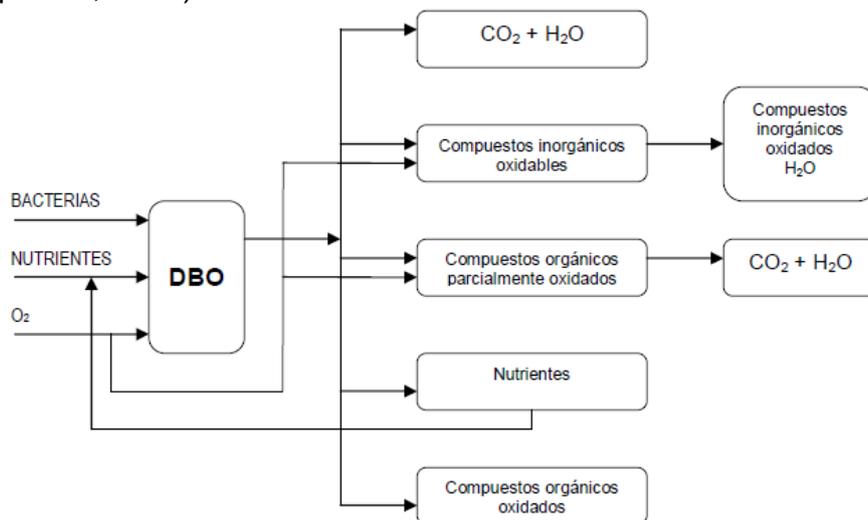


Figura 1. Esquema general de la oxidación biológica (Jarabo et al 2000)

LODOS ACTIVADOS



Figura 2. Esquema tridimensional del proceso de lodos activos.

Comúnmente se utiliza un proceso denominado “lodos activos” que consiste en airear el agua residual en un tanque, para aumentar la población microbiana, que se deposita en forma de lodo en un sedimentador anexo para su separación (Limón, 2013). Este lodo activo (por su elevada concentración de microorganismos), se recicla en buena parte al tanque de aireación y el resto se purga para su tratamiento (fig. 2). Como resultado del tratamiento de las aguas residuales, se realiza un proceso aerobio mecanizado (Escalas, 2006), donde se producen lodos o fangos constituidos en su gran parte de agua (90%) y con una gran carga de materia orgánica (DBO elevado), que es preciso tratar (fig.3) para eliminarlo o aprovecharlo. La secuencia para su tratamiento es el siguiente:

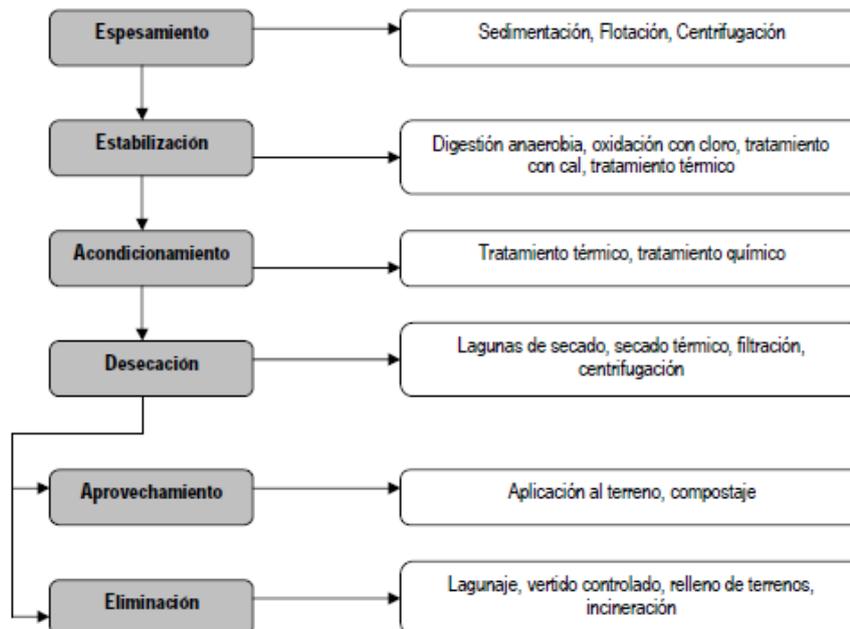


Figura 3. Esquema general del tratamiento de lodos activos.

TRATAMIENTO TERCIARIO

Este tipo de tratamiento también se conoce como proceso complementario, y sólo se utiliza cuando es estrictamente necesario, un ejemplo es la eliminación de desechos que no son biodegradables, como sólidos en suspensión o sales inorgánicas disueltas. La adsorción y la desinfección son sus principales procesos. La adsorción es un fenómeno superficial mediante el cual ciertos productos son retenidos en una gran superficie. Se trata comúnmente con tierras arcillosas o carbón activado. La adsorción es en general, el proceso más indicado para eliminar las moléculas causantes de la coloración y del mal olor de aguas residuales. La desinfección es el procedimiento por medio del cual se destruyen de forma selectiva los gérmenes patógenos, presentes en el agua residual como Salmonella, Shigella, Entamoeba, Enterovirus, Adenovirus y virus A de la Hepatitis (SMADF, 2002). La desinfección de aguas puede realizarse por métodos físicos (calor y radiaciones) o químicos (cloración y ozonificación).

TRATAMIENTO DEL AGUA RESIDUAL EN EL DISTRITO FEDERAL

Para lograr que el agua residual tenga un uso posterior (baños y mingitorios) o para incorporarlos al ciclo hidrológico (riego de áreas verdes), el agua se somete a un proceso en las plantas de tratamiento para las aguas residuales. (Flores, 2009), Sin embargo, ésta operación representa un alto costo económico para las empresas, por lo que la planeación de una planta de tratamiento durante la construcción de las instalaciones de una empresa no es muchas veces contemplada, máxime que la mayoría de las empresas en el Distrito Federal rentan los inmuebles.

El Distrito Federal cuenta con una infraestructura para el tratamiento de las aguas residuales de 71 plantas registradas, 20 operadas por sistemas de aguas de la ciudad de México, cuatro concesionadas, una operada por la UNAM; dos por la SEDENA y 44 más por los mismos usuarios. Su capacidad nominal es de 5855 L/s, pero sólo es efectiva con 3939 L/s; ello significa que se utiliza solamente el 67% de la capacidad de la infraestructura, aun así, figura dentro de los primeros lugares con el mayor volumen de agua residual tratada (fig. 4) (Martínez, 2004).

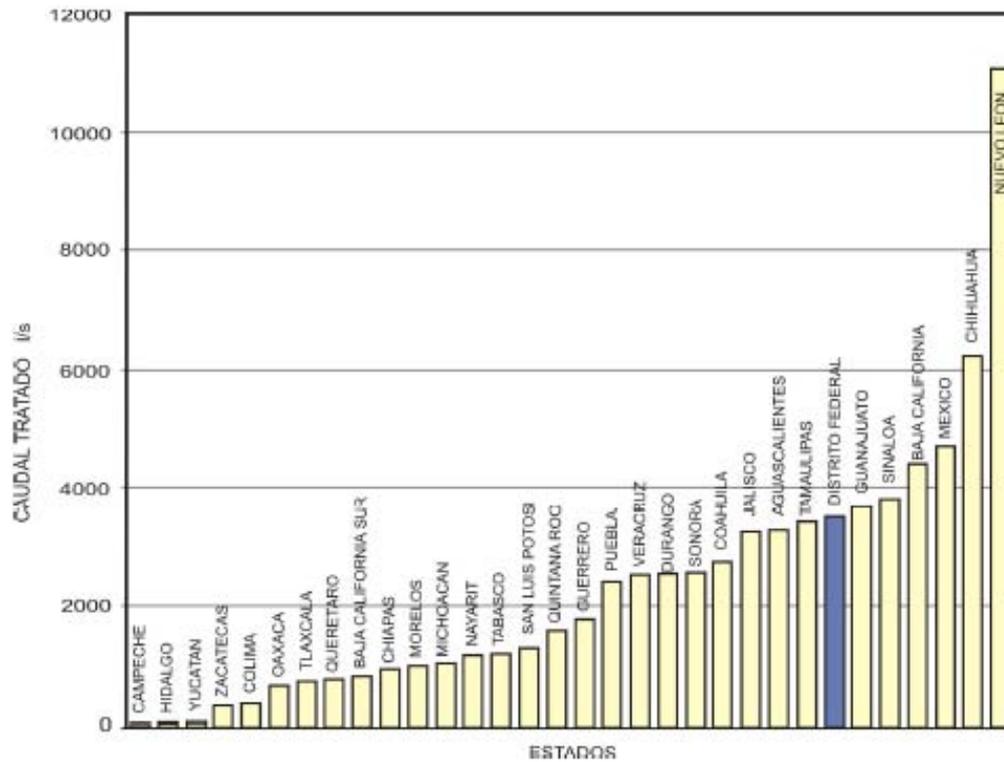


Figura 4. Tratamiento de las aguas residuales por estados a nivel nacional (CONAGUA, 2015)

Las delegaciones proveedoras de agua residual tratada son Iztapalapa, Coyoacán, Gustavo A. Madero, Iztacalco y Miguel Hidalgo (CONAGUA, 2015). La planta de tratamiento más grande del Distrito Federal, está actualmente ubicada en el cerro de la estrella, Iztapalapa, se ha rehabilitado de una manera integral aumentando su volumen tratado de 2 a 3 metros cúbicos por segundo (López, 2008). Existen 23 plantas de tratamiento de aguas residuales operando con un tratamiento secundario, cinco en el nivel terciario y dos que tienen la nueva modalidad de tratar el agua a nivel primario avanzado. La calidad del agua del caudal resultante está definida por el tratamiento que se emplee durante el proceso de saneamiento (fig. 5). El caudal total se conduce por medio de 626 km de redes de distribución, hacia áreas verdes, lagos recreativos, canales de riego y turísticos, así como a zonas industriales (Vázquez, 2008). Se puede observar que la delegación que tiene un mayor volumen de agua residual tratada es Iztapalapa (fig. 5), sin embargo, no tiene un gran número de plantas de tratamiento ya que el costo de la infraestructura es elevado, lo que complica la recuperación y reutilización del recurso hídrico (Vázquez, 2008).

No obstante, existen otros tipos de tratamientos que puede reducir los costos de producción y son amables con el medio ambiente (Palacios, 2011), tal es el caso de los humedales artificiales, que desde hace décadas han sido una alternativa recurrente para el tratamiento de aguas negras, grises e incluso aguas con compuestos químicos inorgánicos (Silva, 2011).

Municipio	Nombre de la Planta	Proceso	Capacidad instalada (l/seg)	Caudal tratado (l/seg)	Cuerpo receptor o reuso	Observaciones
Azcapotzalco	U.H. El Rosario	Lodos activados	25	20	Riego de áreas verdes, llenado del lago parque Tezozomoc	Opera SACM
Coyoacán	Cd. Universitaria	Lodos activados	60	50	Áreas verdes	Concesionada
	Coyoacán	Lodos activados	400	250	Áreas verdes e industrial	Concesionada
Cuauhtémoc	U.H. Nonoalco Tlatelolco	Lodos activados	22	18	Áreas verdes	Opera SACM
Gustavo A. Madero	Acueducto de Guadalupe	Lodos activados	85	76	Áreas verdes e industrial	Concesionada
	San Juan de Aragón	Lodos activados	500	250	Áreas verdes, llenado de lago	Opera SACM
Iztacalco	Cd. Deportiva	Lodos activados	230	130	Áreas verdes e industrial	Concesionada
	U.H. Picos Iztacalco	Lodos activados	13	10	Áreas verdes	Opera SACM
Iztapalapa	Cerro de la estrella	Lodos activados	4,000	2,100	Áreas verdes, industrial, zona agrícola y chinampera de Tláhuac y Xochimilco	Opera SACM
	Santa Catarina	Terciario	20	18	Áreas verdes e industrial	Opera SACM
	Santa Marta Acatitla	Lodos activados	14	8		Inicio operaciones en 2005
Miguel Hidalgo	Bosques de las Lomas	Lodos activados	55	25	Áreas verdes	Opera SACM
	Campo Militar No. 1-A	Lodos activados	30	25	Áreas verdes	Opera SEDENA
	Lomas de Chapultepec	Lodos activados	160	110	Áreas verdes, llenado de lago	Opera SACM
Milpa Alta	San Pedro Actocpan	Lodos activados	60	35	Riego agrícola	Opera SACM
	Villa Milpa Alta Rastro	Rafa o Wabs	30	25		
Tláhuac	Sa Andrés Mixquic	Primario avanzado	30	30	Riego de hortalizas	Opera SACM
	Paraje el Llano	Lodos activados	250	80	Riego agrícola y recarga del acuífero	Opera SACM
	San Juan Ixtayopan	Lodos activados	30	13	Zona agrícola	
	San Juan Ixtayopan (La Lupita)	Lodos activados	15	14	Zona agrícola	Opera SACM
	San Nicolas Tetelco	Lodos activados	30	15	Zona agrícola	Opera SACM
	Tetelco	Primario Avanzado	15	3	Barranca	
	San Lorenzo	Lodos activados	225	55	Llenado de canales y recarga del acuífero	Opera SACM
Tlalpan	Parres	Lodos activados	8	1	Áreas verdes	Opera SACM
	Abasolo	Lodos activados	15	7	Áreas verdes	Opera SACM
	H. Colegio Militar	Lodos activados	20	26	Áreas verdes	Requiere ampliación / opera SEDENA
	San Miguel Xicalco	Lodos activados	6	4	Áreas verdes	Opera SACM
	U.H. PEMEX Picacho	Lodos activados	13	9	Áreas verdes	Opera SACM
Xochimilco	Reclusorio Sur	Lodos activados	30	19	Riego agrícola	Opera SACM
	San Luis Tlaxiatmalco	Lodos activados	150	99	Agrícola / áreas verdes	Opera SACM
TOTAL DE PLANTAS		30	6543.00	3525.00		

Figura 5. Distribución de las plantas de agua residual, tratamiento preponderante y reutilización post tratamiento (CONAGUA, 2015).

II.4 LOS HUMEDALES ARTIFICIALES

El término de humedales artificiales es relativamente nuevo; sin embargo, el concepto es antiguo, pues se tiene conocimiento de que las antiguas culturas como son la China y la Egiptia utilizaban a los humedales naturales para la disposición de sus aguas residuales (Brix, 1994).

En estos sistemas los contaminantes disueltos en las aguas residuales son removidos gracias a una serie de procesos físicos, químicos y biológicos que se expresan de manera natural, entre estos se encuentran la sedimentación, la adsorción a las partículas del suelo, la asimilación por las plantas y la transformación microbiana (Hammer 1989; Brix, 1994).

El primer informe científico que señala las posibilidades que tienen las plantas emergentes para la remoción de los contaminantes presentes en las aguas residuales pertenece a la Dra. Kathe Seidel del Instituto Max Planck, de Alemania. En el informe de sus investigaciones ella plantea que mediante el empleo del junco común (*Schoenoplectus lacustris*) era posible la remoción de una serie de sustancias tanto orgánicas como inorgánicas, así como la desaparición de bacterias (*coliformes*, *Salmonella* y enterococos) presentes en las aguas residuales (Seidel, 1966).

Los resultados de todos sus estudios le permitieron a la Dra. Seidel desarrollar un sistema conocido como proceso del *Instituto Max Planck*, el diseño del mismo consistió de varias etapas de filtración y extracción de contaminantes en las que se combinaba diferentes tipos de humedales (Seidel, 1966).

En Estados Unidos de América el desarrollo de los humedales artificiales se basó en los resultados obtenidos en los humedales naturales y en los trabajos realizados en Europa. (Reed, 1995). En un principio se utilizaron los humedales naturales como una vía para el tratamiento de las aguas residuales; sin embargo, se observó que ocurrían cambios en la composición de las especies comunes de estos sitios por lo que se decidió comenzar a diseñar humedales artificiales para tratar las aguas residuales, los cuales demostraron su eficacia para estos fines (Reed, 1995).

HUMEDALES ARTIFICIALES EN MÉXICO

En 10 de marzo del 2010 se inició el funcionamiento de una planta tratadora de aguas residuales tipo humedal en las comunidades de Tlayca y Tetelilla, Morelos. Los beneficios de esta planta tratadora son múltiples, está constituida por canaletas de bambú, conocidas por su capacidad para limpiar las aguas negras y la absorción del bióxido de carbono, lo que contribuye al cuidado del medio ambiente. Así mismo de esta planta se obtiene “lodo deshidratado” que es aprovechado como abono. Esta obra fue realizada con una aportación federal, estatal y municipal, alrededor de 3000 personas se han visto beneficiadas.

En el año 2006, la Universidad Autónoma Benito Juárez de Oaxaca (UABJO) aplicó un tratamiento de aguas residuales naturales. Este proyecto sigue creciendo y ha dado muchos éxitos al tratar 10,000 metros cúbicos por día de aguas residuales generadas en el *campus*. El tren de tratamiento incluye un reactor anaerobio de flujo ascendente, una laguna facultativa, dos humedales de flujo superficial, un filtro de discos, almacenamiento y terreno de irrigación.

Existe un humedal construido de flujo subsuperficial, ubicado en el municipio de Julián Villagrán que pertenece al municipio de Ixmiquilpan, estado de Hidalgo. Diseñado y dirigido por entidades académicas de la Universidad Autónoma de México (UNAM)

CLASIFICACIÓN DE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES

Se proponen diversos diseños de humedales artificiales que debido a sus variables de construcción pueden hacer referencia al sistema de flujo del agua residual, sustrato o lecho utilizado, vegetación y sucesión de unidades de tratamiento (Vymazal. & Kröpfelová. 2009).

HUMEDALES DE FLUJO HORIZONTAL

La alimentación de este tipo de humedales comienza en la entrada del dispositivo y sigue su camino bajo la superficie de la cama en un camino horizontal hasta llegar a la zona de salida. Debido a un largo tiempo de retención de las aguas residuales, y la eliminación de sólidos suspendidos totales, (SST) por lo general superiores a 80-90%, es posible en un alto grado de remoción. La disminución de oxígeno es característica de este tipo de sistemas. En cuanto a la dirección del movimiento del agua a través del humedal se consideran los siguientes tipos: de flujo subsuperficial y flujo superficial (Zhang *et al.*, 2011).

HUMEDALES DE FLUJO VERTICAL

Son artificiales de manera que el agua se mueve de manera uniforme hacia abajo a través del sustrato. Las aguas residuales se alimentan de toda la superficie a través de un sistema de distribución y pasa por el filtro en una trayectoria más o menos vertical. La dosificación de las aguas residuales en la cama se realiza de forma intermitente. Debido a las condiciones aeróbicas en su mayoría en estos sistemas el oxígeno que requieren las bacterias nitrificantes son favorecidas y la nitrificación se puede lograr. Sin embargo, la desnitrificación no podrá tener lugar en gran medida (Yalcuk & Ugurlu, 2009).

HUMEDALES ARTIFICIALES DE FLUJO SUBSUPERFICIAL

El agua residual previamente tratada pasa a través del sustrato de filtración lentamente. Durante este trayecto el agua residual se pondrá en contacto con una red de zonas aeróbicas, anóxicas y anaeróbicas (Llagas y Guadalupe, 2006).

Tienen una forma similar a la de un estanque con una geomembrana o una capa plástica impermeable, se utiliza un lecho de tierra o grava como sustrato para el crecimiento de las plantas. Las aguas residuales pretratadas fluyen por gravedad, horizontal o verticalmente, a través del sustrato donde se pone en contacto una mezcla de bacterias facultativas que viven en asociación con el sustrato y las raíces de las plantas (Vymazal, 2009).

Los sistemas de flujo subsuperficial son reportados con menor incidencia en problemas de malos olores, insectos, o problemas con la exposición pública (Gordon & Feo, 2009).

HUMEDALES ARTIFICIALES DE FLUJO SUPERFICIAL LIBRE

Son los diseños más antiguos pues su infraestructura trata de ser lo más similares a los ambientes naturales debido a la permanente agua estancada y las condiciones favorables para las especies de plantas, pero este tipo de humedales son menos numerosos que los sistemas de flujo sub-superficial. Estos sistemas consisten típicamente de estanques o canales, con alguna clase de barrera subterránea para prevenir la filtración por lo general tienen un fondo de suelo, una alta densidad de vegetación emergente, y una superficie de agua por encima del sustrato. El diseño puede o no incluir las áreas de aguas abiertas, además de las zonas con vegetación, y por lo general la profundidad de las aguas son menos de 0,4 m (López 2011).

El sustrato en que están enraizadas las plantas y se utiliza para este tipo de humedales, tiene una baja conductividad y no permite un flujo significativo a través de la zona radicular. La eliminación de contaminantes se produce a través de reacciones que tienen lugar en el agua y en la zona superior del sustrato, por lo que su potencial de eliminación se ve fuertemente restringido. Sin embargo, siguen siendo utilizados con frecuencia en diversas partes del mundo (Kadlec, 2009).

II.5 REUTILIZACIÓN DEL AGUA EN MÉXICO

Las entidades regulatorias en cuestiones de cuidado del agua anuncian que una de las principales formas para atender los problemas del déficit del agua, son los programas de ahorro, conservación y uso eficiente del agua. En México se ha optado por optimizar el uso del agua y de la infraestructura correspondiente, con la participación activa de los usuarios y con un alto sentido de equidad social (CONAGUA 2015). Sin embargo, la realidad es que en el Distrito Federal de acuerdo con un diagnóstico elaborado por el Sistema de Aguas de la Ciudad de México y la Secretaría del Medio Ambiente, se pierden 11.825 metros cúbicos por segundo de agua potable, 5.025 se desperdician en Gustavo A. Madero, Iztapalapa y Álvaro Obregón, además de los 360 litros promedio de agua que utiliza un solo individuo en el Distrito Federal, es desperdiciado el 44% de dicha cantidad (CONAGUA 2015).

La reutilización en agricultura de las aguas residuales tratadas es una opción que se está estudiando y adoptando cada vez más en regiones con escasez de agua. Muchas regiones del mundo están experimentando crecientes problemas de déficits hídricos. Esto se debe al crecimiento implacable de la demanda de agua frente a unos recursos hídricos estáticos o en disminución y a las periódicas sequías debidas a factores climáticos. Además de estas presiones se estima que un calentamiento global de 2° C, como consecuencia del cambio climático, podría llevar a una situación en la que de uno a dos mil millones de personas no cuenten con agua suficiente para satisfacer sus necesidades de consumo, higiene y alimentarias. La escasez de este líquido también se produce por la generación de aguas residuales y el agua de escorrentía de las ciudades (gran parte de éstas aguas sólo se trata parcialmente), por los excesos de fertilizantes agrícolas y por otras causas de contaminación hídrica. Esta contaminación produce, entre otras cosas, la eutrofización de las aguas superficiales trayendo consigo la proliferación de algas. Además, la contaminación del agua empeora la escasez al reducir la cantidad de agua segura para el consumo humano. Los mismos factores provocan hipoxia en los estuarios y aguas costeras, lo que afecta a la pesca y al resto de la vida acuática e impactan de manera negativa en la integridad del ecosistema. Éste

es un problema tanto para el medioambiente como para las economías locales que dependen del turismo y de la pesca (Winpenny *et al.*, 2013).

En el programa de manejo sustentable del agua, se indica que aun cuando en el subsuelo existe agua suficiente para abastecer a la capital por varios cientos de años más, de no incrementarse el almacenamiento, los problemas de hundimiento en toda la ciudad continuarán en una medida entre 0.02 a 0.4 metros por año, con el peligro de que se agudice.

REUTILIZACIÓN URBANA

Son escasas las instalaciones familiares para el aprovechamiento del agua gris, en la delegación Xochimilco esta reportado que en la vivienda ubicada en monte Albán N° 365 colonia Olivar Santa María en la Delegación Xochimilco, en el Distrito Federal, es habitada por 5 personas, con una distribución de: 1 recámara para los padres, 3 recámaras para los hijos e hijas, 1 cocina con estufa y fregadero, 2 baños completos con inodoro y regadera, 1 medio baño con lavamanos, cocina con estufa y fregadero, sala, comedor, patio de servicio, estacionamiento para un auto con lavadero, jardín y huerta (fig. 6). Donde los habitantes consumieron durante 1 año un promedio diario de 90 litros por día agua potable. (Romero, 2009).

Se hicieron separaciones en la tubería para independizar el efluente de agua gris del efluente de aguas negras, para poder usar el agua gris en sus huertos, sin embargo, al ser solo un trabajo de ingeniería no se tomaron en cuenta los riesgos de la posible salinización del suelo ya que no existió un muestreo del agua residual, ni tampoco un tratamiento previo antes de ser utilizada.

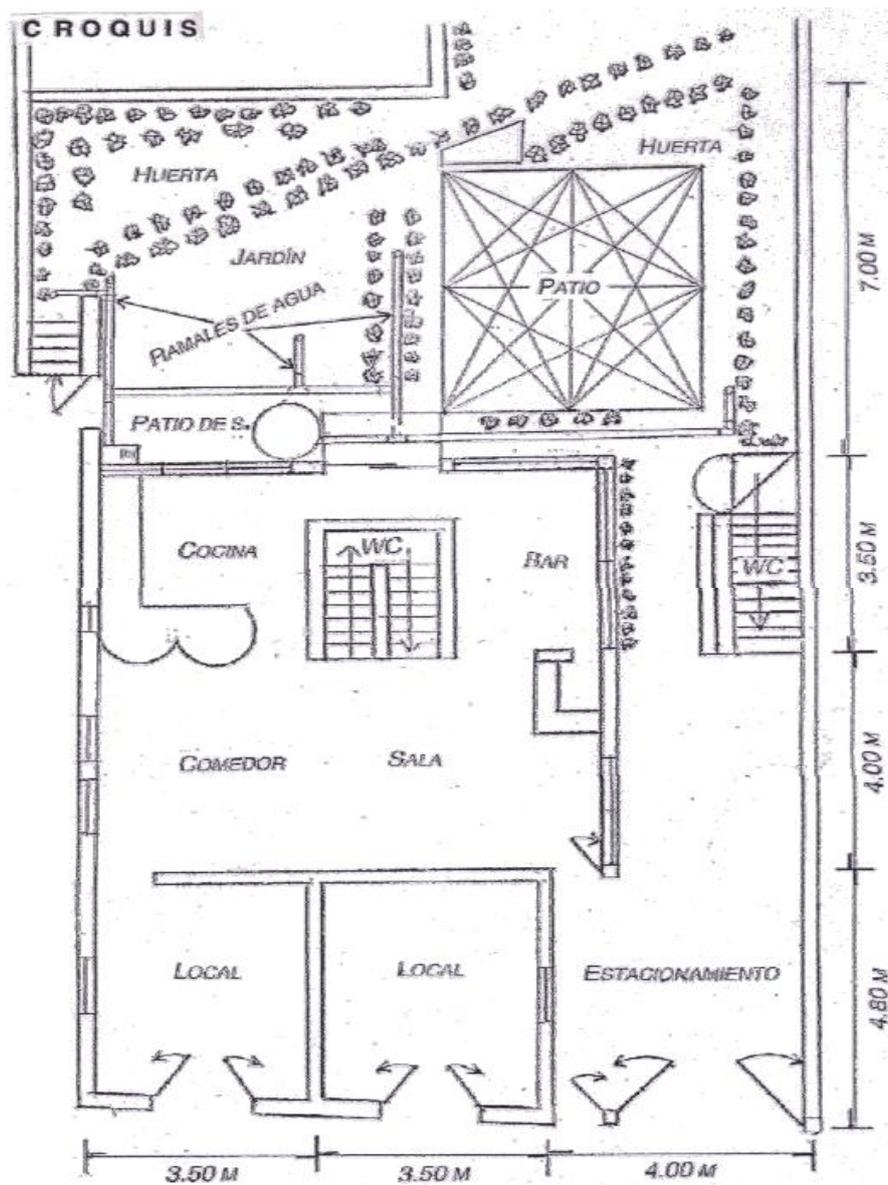


Figura 6. Croquis de la vivienda que cuenta con el sistema de aprovechamiento de aguas grises (Romero 2009)

REUTILIZACIÓN DEL AGUA GRIS PARA EL CULTIVO EN INVERNADEROS

El uso en agricultura de agua gris tratada es una opción que se está estudiando y adoptando cada vez más en regiones con escasez de agua, poblaciones urbanas crecientes y con una mayor demanda de agua de riego (Winpenny *et al.*, 2013).

La viabilidad de la reutilización dependerá de las circunstancias locales, las cuales afectarán el equilibrio entre los costos y los beneficios. Probablemente el principal beneficio en la mayoría de los casos sea el valor del agua dulce que se intercambia por un uso urbano o industrial de mayor valor (Winpenny *et al.*, 2013). El uso de agua regenerada puede ayudar a mitigar los efectos negativos de la escasez del agua a nivel local. No es la única opción para lograr un mejor equilibrio entre la oferta y la demanda, pero en muchos casos es una solución costo-eficacia, como lo demuestra el creciente número de sistemas de reutilización en diferentes partes del mundo (Aquarec, 2006), se recomienda tener en cuenta los parámetros de calidad del agua que se muestran en la figura 7, como un patrón de determinación de la calidad del agua que se pretenda utilizar en irrigación (Ghunmi *et al.*, 2011).

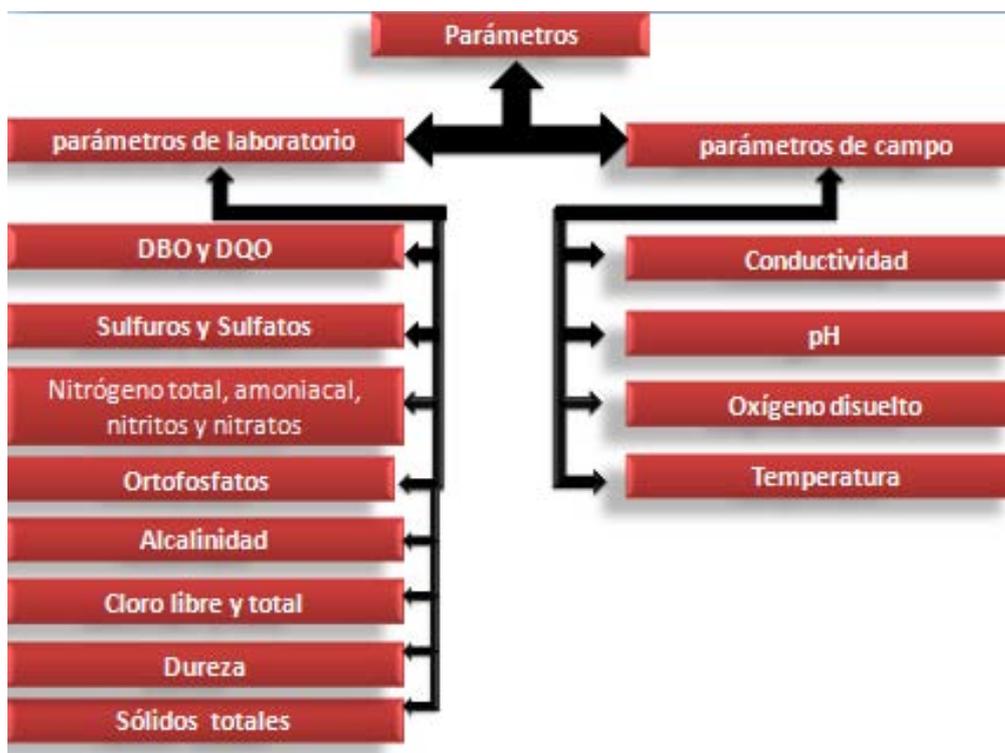


Figura 7. Parámetros estandarizados para determinar la calidad del agua.

La calidad del agua de riego debe evaluarse en función de la severidad de los problemas que producirá su uso prolongado (Ghunmi *et al.*, 2011). En el caso del agua de riego los principales problemas se originan en suelos provocando salinidad, disminución de tasa de infiltración y toxicidad por iones específicos. Otros problemas que también se consideran en la evaluación de calidad del agua de riego son los producidos por un exceso de nutrimentos, bicarbonato, sulfato, pH anormal, magnesio, grasas y aceites, inestabilidad del agua y formación de depósitos que endurecen el agua. Todos estos problemas se asocian a parámetros de calidad de agua que son fácilmente cuantificables (Aquarec, 2006).

LOS INVERNADEROS

Un invernadero es una instalación dentro de la cual se suministran de manera racional todos los factores que intervienen en el desarrollo de las plantas (luz, agua, temperatura y nutrimentos), proporcionando buenas condiciones para el logro de resultados económicos favorables. Hoy en día, los invernaderos son una de las grandes alternativas para la producción de alimentos en general (Bernat 1990). Donde se pueden cultivar flores, hortalizas y otras plantas, que le permitan al productor lograr un mayor ingreso familiar en la unidad de producción; es una alternativa que se puede realizar en pequeñas superficies dentro de su traspatio con buenos resultados (SAGARPA, 2014).

En general existen dos tipos básicos de invernaderos modulares conocidos como dos aguas y el de techumbre parabólica o de arco parabólico (fig. 8), La estructura de un invernadero es un factor de amplia importancia, ya que la resistencia que tenga será relacionada con la economía del proyecto de construcción (Palacios, 2011). La estructura está conformada por el conjunto de elementos verticales, horizontales y curvos, que son los que le otorgan la forma y resistencia al invernadero y su función es soportar la carga y esfuerzos que ocasionan los materiales de cubierta, los aparatos de climatización o de riego, el viento, el granizo (SAGARPA, 2014).

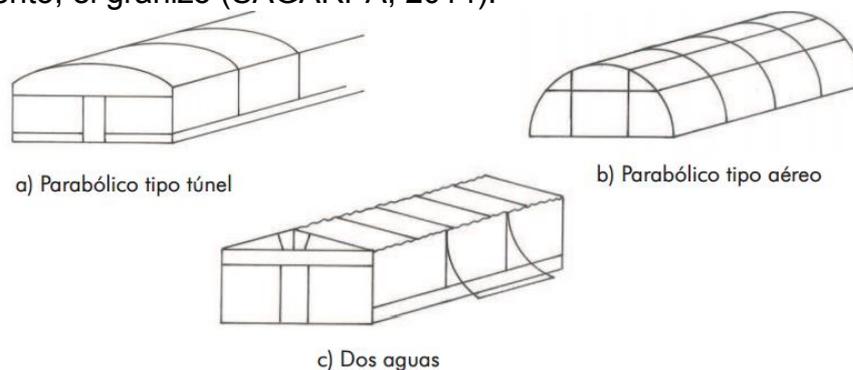


Figura 8. Tipos de invernaderos (SAGARPA 2014).

INFRAESTRUCTURA PARA EL TRATAMIENTO DEL AGUA GRIS A NIVEL FAMILIAR

La viabilidad de los proyectos de reutilización depende de una serie de factores clave. Las características físicas y geográficas del área deben ser propicias para un intercambio de derechos de agua entre las partes involucradas. Además se tiene que efectuar una previa planeación del sistema de tratamiento en función de las características de la vivienda. Los costos adicionales (de tratamiento e infraestructura) deben ser accesibles en relación con los beneficios. Los futuros usuarios depende del impacto neto en sus ingresos, finalmente, el impacto ambiental debe ser aceptable: el mismo impacto puede ser aceptable o no en diversas circunstancias y diferentes autoridades ponderarán de manera diferente impactos específicos para formarse un juicio global (Winpenny *et al.*, 2013).

CULTIVO PLANTAS EN INVERANDERO ANÁLISIS DEL CRECIMIENTO VEGETAL

El análisis de crecimiento refleja una aproximación cuantitativa, que usa datos simples y básicos, para describir a las plantas que crecen bajo ambientes naturales, seminaturales o controlados. El análisis matemático de crecimiento usa medidas directas tales como biomasa seca total de la planta, área foliar total y tasa relativa de crecimiento (Quesada y Bertsh, 2012)

Hay dos metodologías para efectuar el análisis de crecimiento, i) análisis tradicional o clásico que involucra la toma de datos en función del tiempo (cada una o dos semanas) en un gran número de muestras con los cuales se generan funciones paramétricas flexibles que describen y explican el crecimiento y desarrollo de las plantas, así como la elaboración de curvas de crecimiento. ii) análisis funcional o dinámico el cual comprende medidas a intervalos de tiempo más frecuentes y en un pequeño número de plantas (Barrera *et al.*, 2010). Las medidas directas que se tienen en cuenta para el análisis de crecimiento de las plantas son la biomasa seca y el área foliar. La primera se obtiene por la diferencia entre la biomasa fresca y seca.

El área foliar, es obtenida con la medida de la superficie de las hojas fotosintéticamente activas. Se puede hacer por métodos directos calcando la silueta de la hoja en papel y calculando por planimetría (medidores de área foliar, escaneo y análisis de imágenes). El escaneo de imágenes consiste en escanear las siluetas de cada hoja y mediante un software de imágenes calcular el área. Los métodos indirectos o alométricos permiten estimar el área foliar a partir de la medida directa de las dimensiones de la hoja, especialmente el largo y el ancho (Meza & Bautista, 1999).

III. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El crecimiento de la población en la delegación Iztapalapa, el aumento en la demanda de agua para consumo humano e insuficiencia de la infraestructura hídrica para el tratamiento de aguas residuales, son los principales factores para que la calidad de vida de los actuales pobladores de la unidad ex lienzo charro ubicada en esta delegación se vea mermada. La desinformación acerca de cómo efectuar, la reutilización del agua gris y la poca importancia por la conservación y aprovechamiento de las áreas verdes dentro de este complejo habitacional, han derivado un gran desperdicio de agua que puede ser aprovechada para diversos fines, además los espacios asignados como áreas verdes de uso comunitario se vean afectados e incluso sustituidos por instalaciones como estacionamientos, almacenes o tiraderos de basura. Esto incide nuevamente en el deterioro del medio ambiente y la calidad de vida de los mismos pobladores

Los humedales artificiales son una alternativa versátil, de bajo costo y eficiente para el tratamiento de aguas residuales que pueden solventar de manera directa la problemática actual de la población de este complejo habitacional que son la falta de cultura en el cuidado y reutilización del recurso hídrico

IV. JUSTIFICACIÓN

Los complejos habitacionales son en la actualidad áreas de oportunidad para el emprendimiento de tecnologías amigables con el ambiente, que promuevan la conciencia sobre la reutilización del agua y las áreas verdes dado que la arquitectura utilizada para su construcción es reiterada (Infraestructura, GEO 1998). Esto permite la planeación de sistemas hidráulicos para el tratamiento y la reutilización del agua gris como consecuencia del fácil acceso a los sistemas de drenaje que componen su infraestructura. Sin embargo, la zona urbana de Iztapalapa carece de dicha infraestructura.

Por disposición gubernamental y en función de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, todas las unidades habitacionales en el Distrito Federal, deberán tener incluir desde su planeación, áreas de uso común para sus habitantes, tal es el caso de las áreas verdes, la OMS establece que como mínimo que existan 9m² por habitante para garantizar una mejor calidad de vida, sin embargo la delegación Iztapalapa brinda a sus pobladores solo 2m² de áreas verdes por persona. Bajo este paradigma se puede plantear el aprovechamiento de dichas áreas sin perturbarlas o desgastarlas haciéndolas una fuente sustentable de recursos vegetales.

Por lo anterior es necesario evaluar la calidad del agua gris que se origina en las viviendas de un complejo habitacional para su tratamiento por medio de un humedal artificial, que permitirá identificar tanto los aspectos particulares de la calidad del agua y su posible reutilización como fuente primaria para el riego ya sea de áreas verdes o de un invernadero donde se cultivarán hortalizas. De esta manera, se podrán aportar elementos que contribuyan a mejorar el manejo del recurso y minimizar los impactos negativos que puedan provenir de los descuidos de los habitantes hacia las áreas verdes de su comunidad.

V. ÁREA DE ESTUDIO

La unidad habitacional “Ex Lienzo charro”, está ubicada en av. Manuel Escandón no. 64 col. Álvaro Obregón en la delegación Iztapalapa (fig. 9), y forma parte del conjunto de 132 unidades habitacionales presentes en la delegación Iztapalapa (SIDESO, 2010), este complejo habitacional está constituido por 650 viviendas y 3500 habitantes (infodf, 2012),



Figura 9. Imagen satelital de la unidad habitacional “Ex lienzo charro” ubicada en Av. Manuel Escandón No 64 en la colonia Álvaro Obregón de la delegación Iztapalapa. Fuente: Google Earth Inc

En diciembre de 1999 se entregaron las primeras viviendas de este complejo habitacional y para el año 2006, todas las viviendas ya habían sido vendidas o asignadas. Sin embargo, dicho complejo ha sido noticia en repetidas ocasiones ya que ha sufrido de dos inundaciones en los años de 2010 y la más fuerte en el año 2012, donde las autoridades del gobierno del Distrito Federal por medio de Protección Civil dictaminaron inhabitables las unidades y se le consideró como zona de alto riesgo. Las viviendas dúplex de la unidad que, recién habitada en 1999, se distinguían desde la avenida Guelatao, ubicada a medio kilómetro, en la actualidad apenas logran verse las tejas rojas de sus techos, pues según estudios de las propias autoridades capitalinas la zona registra hundimientos que evidencian un desnivel de cuatro metros.

Actualmente las obras para mitigar las inundaciones han surtido efecto y ya para el 2015 son 3 años de calma ante las épocas de lluvia, sin embargo el grado de afectación en la infraestructura de las viviendas tras las inundaciones han marcado un claro devaluó en la plusvalía de las construcciones.

CLIMA

El clima de la delegación Iztapalapa es un C(w), es decir templado, subhúmedo con lluvias en verano, con un porcentaje de lluvia invernal entre 5.0 y 10.2 mm del total anual, el más seco con una precipitación de 40 mm. Siendo el más seco de los templados sub húmedos, con lluvia en verano con un cociente P/T de 43.2 (CONAGUA, 2013).

VI. OBJETIVOS:

General:

Establecer un filtro de humedal casero para el tratamiento de aguas grises provenientes de lavabos, fregaderos, lavaderos, regaderas y lavadoras del condominio y su reutilización dentro de un invernadero rústico, en la delegación Iztapalapa, México, Distrito Federal.

Específicos:

1. *Determinar la calidad del agua gris generada en una unidad familiar.*
2. *Construir un invernadero y un humedal artificial para el tratamiento de aguas grises.*
3. *Evaluar la eficiencia de remoción de contaminantes por el sistema de tratamiento.*
4. *Determinar el impacto que el agua gris ocasione en el sustrato y el establecimiento de plantas hortalizas y ornamentales.*

VII. MÉTODOS

VII.1 GABINETE

En esta fase se realizó una recopilación de referencias bibliográfica así como el análisis estadístico de los datos obtenidos durante los meses de muestreo, se utilizaron promedios máximos y mínimos, pruebas univariadas (análisis de varianza) utilizando paquetería de office (Excel) y el programa R2.

VII.2 CAMPO

La logística de campo se dividió en cuatro fases principales que comprendieron la construcción de un invernadero rústico basado en el manual de construcción de SAGARPA (Anexo 5), con una variante en el uso de madera como esqueleto, dado que se utilizó PVC para su construcción como medida de reducción de peso y así evitar hundimientos en el terreno, esto se llevó a cabo del mes de agosto del 2014 a septiembre del 2014 (fig. 10, 11).



Figura 10. Primera fase de la construcción del invernadero rústico



Figura 11. Segunda fase de la construcción del invernadero rústico

La construcción del sistema de humedal artificial se dividió en el diseño del sistema de tratamiento (filtro y humedal artificial) e identificación y desviación de las principales fuentes de aguas grises de la vivienda al sistema de tratamiento previamente construido, este fue realizado en los meses de octubre del 2014 a noviembre del 2014 (fig.12, 13, 14, y 15).



Figura 13. Desviación del agua grises al sistema de tratamiento (Anexo 4)



Figura 12. Construcción del filtro de arenas y gravas (Anexo 4)



Figura 14. Construcción del humedal artificial dentro del invernadero



Figura 15. Adaptación de la bomba para el sistema de riego

Durante el mes de diciembre del 2014 se realizó la fase de siembra donde se utilizaron diferentes tipos de materiales reciclables y reutilizables para la construcción de semilleros y macetas ecológicas, que posteriormente fueron rellenas con diferentes tipos de sustrato para el cultivo de hortalizas (fig. 16).



Figura 16. Etapas de siembra dentro del invernadero

En la cuarta etapa se realizó un muestreo mensual durante el periodo de enero del 2015 a junio del 2015 tanto del influente y efluente del sistema de filtración y humedal construido, donde se determinaron *in situ* algunos parámetros físicos y químicos (temperatura, pH, conductividad, oxígeno disuelto con un equipo multiparámetro YSI profesional y OAKTON (fig. 17).



Figura 17. Muestra del influente y el efluente y equipo multiparámetrico OAKTON

VII.3 LABORATORIO

En el laboratorio se evaluaron los parámetros físicos, químicos y biológicos. Para la determinación de dureza, alcalinidad, cloro total y libre, nitrógeno amoniacal, nitratos de alto rango, nitritos de alto rango, fosfatos, se utilizó un equipo HACH DR/890 Colorimétrico (fig.18); Se evaluó la demanda bioquímica de oxígeno (DBO5) siguiendo el método de la norma NMX-AA-028-SCFI-2001, que consiste en medir la cantidad de oxígeno que requieren los microorganismos para efectuar la oxidación de la materia orgánica presente en aguas naturales y residuales y se determina por la diferencia entre el oxígeno disuelto inicial y el oxígeno disuelto al cabo de cinco días de incubación a 20 °C. Para la determinación de la demanda química de oxígeno (DQO) el método indicado por la norma NMX-AA-030-SCFI-2001, cuyo principio parte de una gran cantidad de compuestos orgánicos e inorgánicos que son oxidados con una mezcla de ácido crómico y sulfúrico a ebullición. Adicionalmente los siguientes parámetros fueron analizados para la determinación de la calidad del suelo donde se tenían los cultivos, una vez irrigado con el agua del efluente y sin irrigar, para descartar contaminación por salinización: carbonatos, bicarbonatos, cloruros, así como también el pH, la temperatura y la capacidad de intercambio catiónico, (fig. 19) en función a la NOM-021-SEMARNAT-2000, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis.



Figura 18. Determinación de la calidad del agua con equipo HACH DR/890



Figura 19. Análisis de sustrato irrigado y no irrigado

VIII. RESULTADOS

Durante seis meses se tomaron muestras del agua que provenía del influente y del efluente, con intervalos de un mes, en los cuadros 1 y 2 se muestran las concentraciones de los parámetros tomados en cuenta para la determinación de la calidad del agua del influente y el efluente respectivamente, en los cuadros 3 y 4 se muestran los valores máximos y mínimos de los mismos parámetros, mientras que en el cuadro 6 se muestran los valores de F y valores críticos de F del análisis de varianza realizado a los datos colectados durante el semestre de investigación. Las concentraciones de carbonatos, bicarbonatos y cloruros que presentaron las muestras de sustrato irrigado y no irrigado se muestran en el cuadro 5, Los resultados del crecimiento en los cultivos de hortalizas se muestran en los cuadros 7, 8 y 9 mientras que sus registros fotográficos se presentan en las figuras 40, 41 y 42. Finalmente el establecimiento de las plantas en el humedal se expone en la figura 43.

CALIDAD DEL AGUA

Cuadro 1. Resultados analíticos de la calidad del agua del influente

Parámetros analizados	INFLUENTE						Media	Varianza	Desviación
	Mes 1	Mes 2	Mes 3	Mes 4	Mes 5	Mes 6			
Temperatura/°C	22.9	22.8	23	24.3	22.9	24	23.32	0.43	0.03
pH	7.25	7.22	7.35	6.9	7.22	7.33	7.21	0.03	0.03
O ₂ disuelto/ppm O ₂	4.07	4.44	4.81	5.18	4.43	5.6	4.76	0.31	0.03
Conductividad/ μS	0.19	0.17	0.17	0.14	0.16	0.12	0.16	0.00	0.00
Cianuro mg/L	0.004	0.001	0.0003	0.0004	0.0001	0.0003	0.00	0.00	0.00
Cobre/ mg/L Cu	1.3	1.47	1.25	1.3	1.67	2.04	1.51	0.09	0.03
Cloro total/mg/l CL	0.5	0.5	0.77	0.5	0.87	0.5	0.61	0.03	0.03
DBO/mg/L O ₂	42	47	44	44	53	41	45.17	18.97	0.03
DQO/mg/L O ₂	190	206	194	217	217	212	206.00	135.60	0.03
Dureza/ mg/L ⁻¹	76.1	74	74.37	74.74	71.2	70.6	73.50	4.60	0.03
Ortofosfatos/ mg/ L PO ₄ ³⁻	1.14	1.04	1.78	1.16	1.09	1.46	1.28	0.08	0.03
Nitritos NO ₂	0.00008	0.000068	0.000076	0.000081	0.000079	0.00007	0.00	0.00	0.00
Nitrato NO ₃	0.047	0.038	0.046	0.036	0.026	0.03	0.04	0.00	0.00
Nitrógeno amoniacal	1.2	0.65	0.57	0.98	0.84	0.66	0.82	0.06	0.00
SAAM	2.4	2.7	3.1	2.4	3.4	3.3	2.88	0.20	0.00

Cuadro 2. Resultados analíticos de la calidad del agua del influente

Parámetros analizados	EFLUENTE						Media	Varianza	Desviación
	Mes 1	Mes 2	Mes 3	Mes 4	Mes 5	Mes 6			
Temperatura/°C	27	27.3	26.9	25.8	27.3	26.8	26.85	0.31	0.5
pH	7.08	7.1	7.2	6.9	7.06	7.12	7.08	0.01	0.1
O ₂ disuelto/ppm O ₂	2.86	3.87	4.24	2.98	3.97	4.34	3.71	0.41	0.6
Conductividad/ μS	0.17	0.14	0.14	0.12	0.13	0.1	0.13	0.00	0.0
Cianuro mg/L	ND						0.00	0.00	0.0
Cobre/ mg/L Cu	1.10	1.39	0.77	0.60	0.50	0.87	0.87	0.11	0.3
Cloro total/mg/l CL	0.30	0.28	0.19	0.40	0.46	0.77	0.40	0.04	0.2
DBO/mg/L O ₂	34	19	27	29	26	22	26.17	27.77	5.2
DQO/mg/L O ₂	138	127	125	171	164	174	149.83	502.17	22.4
Dureza/ mg/L ⁻¹	67.00	69.00	69.37	68.30	71.00	64.00	68.11	5.78	2.4
Ortofosfatos/ mg/ L PO ₄ ³⁻	0.96	0.76	0.88	0.86	0.76	0.56	0.80	0.02	0.1
Nitritos NO ₂	0.000026	0.000022	0.000063	0.000041	0.000026	0.000023	0.00	0.00	0.0
Nitrato NO ₃	0.019	0.016	0.014	0.028	0.019	0.029	0.02	0.00	0.0
Nitrógeno amoniacal	0.46	0.38	0.37	0.56	0.74	0.61	0.52	0.02	0.1
SAAM	1.67	1.69	2.8	1.97	2.34	1.68	2.03	0.21	0.4

Cuadro 3. Valores máximos, mínimos y media de los parámetros analizados para calidad del agua del influente.

Parámetros / INFLUENTE	Unidades	Mínimo	Máximo	Media
Temperatura	°C	22.8	24.3	23.32
pH		6.9	7.35	7.21
O ₂ disuelto	ppm L-1	4.07	5.6	4.76
Conductividad	µS	0.19	0.12	0.16
Cianuro	mL/L	0.001	0.004	ND
Cobre	mL/L	1.25	2.04	1.51
Cloro total	mL/L	0.5	0.87	0.61
DBO	mL/L	41	53	45.17
DQO	mL/L	110	146	121.50
Dureza	mL/L	70.6	76.1	73.50
Ortofosfatos	mL/L	1.04	1.78	1.28
Nitritos NO ₂	mL/L	0.00007	0.000081	ND
Nitrato NO ₃	mL/L	0.026	0.046	0.04
Nitrógeno amoniacal	mL/L	0.65	1.2	0.82

Cuadro 4. . Valores máximos, mínimos y media de los parámetros analizados para calidad del agua del efluente.

Parámetros / EFLUENTE	Unidades	Mínimo	Máximo	Media
Temperatura	°C	27.3	25.8	26.85
pH		6.9	7.12	7.08
O ₂ disuelto	ppm L-1	2.86	4.34	3.71
Conductividad	µS	0.17	0.1	0.13
Cianuro	mL/L	0.0001	0.0001	ND
Cobre	mL/L	0.5	1.39	0.87
Cloro total	mL/L	0.3	0.77	0.40
DBO	mL/L	19	34	26.17
DQO	mL/L	103	112	107.50
Dureza	mL/L	64	69.37	68.11
Ortofosfatos	mL/L	0.56	0.96	0.80
Nitritos NO ₂	mL/L	0.000023	0.000063	ND
Nitrato NO ₃	mL/L	0.14	0.28	0.02
Nitrógeno amoniacal	mL/L	0.37	0.61	0.52

CALIDAD DEL SUSTRATO

Cuadro 5. Concentraciones de carbonatos, bicarbonatos y cloruros.

Parámetro	Carbonatos	Bicarbonatos	Cloruros	Temperatura	Conductividad	pH
Unidad de medida	mmol/L	mmol/L	mmol/L	°C	µS	mg/L
SUELO NO IRRIGADO						
Muestra 1	8	15	7	24.2	8.7	7.75
Muestra 2	12	17	9.5	24.6	7.9	7.78
Muestra3	8	15	7	24.2	8.4	7.65
Promedio	10	16	8.25	24.4	8.3	7.765
Parámetro	Carbonatos	Bicarbonatos	Cloruros	Temperatura	Conductividad	pH
Unidad de medida	mmol/L	mmol/L	mmol/L	°C	µS	mg/L
SUELO IRRIGADO						
Muestra 1	9	19	10.5	25.1	11.9	7.87
Muestra 2	9	19	12.5	24.9	11.8	7.89
Muestra3	11	19	12	24.9	12.1	7.84
Promedio	9	19	11.5	25	11.85	7.88

Cuadro 6. Análisis de varianza de la calidad del agua de los parámetros del sistema de tratamiento

ANÁLISIS DE VARIANZA		
PARÁMETRO	Valor de F	Valor crítico de F
PH	3.020440107	4.964602744
O₂ DISUELTO	9.104887234	4.964602744
CONDUCTIVIDAD	3.223495702	4.964602744
CLORO TOTAL	3.655382275	4.964602744
DQO	13.67882716	4.964602744
DBO	11.34807418	4.964602744
DUREZA	16.79423237	4.964602744
ORTOFOSFATOS	13.74378805	4.964602744
NITRITOS NO₂	37.27955737	4.964602744
NITRATO NO₃	14.61351187	4.964602744
NITRÓGENO AMONICAL	6.750468723	4.964602744

VEGETALES COSECHADOS

Cuadro 7. Datos del crecimiento de la especie *Cucurbita pepo*

Vegetal	Días después del trasplante	Área Foliar cm ²	Masa seca g	Cobertura del área foliar cm ²
 <i>Cucurbita pepo</i>	13	30.21	1.62	154.40
	20	63.51	1.93	131.55
	27	112.90	2.86	138.56
	34	170.48	2.88	144.57
	41	257.54	7.60	182.01
	48	345.08	9.83	173.42
	55	323.08	11.67	163.20
	62	354.20	16.90	173.44
	69	308.08	16.98	176.45

Cuadro 8. Datos del crecimiento de la especie *Lycopersicon esculentum* c.v. Naomi f1

Vegetal	Días después del trasplante	Área Foliar cm ²	Masa seca g	Cobertura del área foliar cm ²
 <i>Lycopersicon esculentum</i> c.v. Naomi f1	23	34.95	1.18	63.95
	30	53.70	1.49	86.71
	37	85.86	2.83	145.68
	44	85.70	4.93	271.88
	51	89.65	4.34	397.31
	58	85.89	6.47	312.75
	65	86.14	12.63	382.58
	72	86.22	13.93	393.21
	79	86.27	16.70	393.21

Cuadro 9. Datos del crecimiento de la especie *Lactuca sativa*

Vegetal	Días después del trasplante	Área foliar cm ²	Masa seca g	Cobertura del área foliar cm ²
 <i>Lactuca sativa</i>	13	12.01	1.93	46.70
	20	22.50	2.86	43.50
	27	27.30	2.83	51.33
	34	39.46	4.93	56.13
	41	48.36	6.47	52.12
	48	48.22	7.60	64.23
	55	50.26	11.67	51.33
	62	51.40	13.93	58.45
	69	51.14	15.64	66.87

VIII. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

El uso de humedales artificiales se ha utilizado de manera frecuente en varios países, por lo que es necesario su estudio para encontrar las óptimas características químicas y de diseño con el fin de maximizar su eficacia en la depuración de las aguas residuales. Este proyecto tuvo como finalidad la construcción de un prototipo de tratamiento de aguas grises que provengan del uso doméstico en complejos habitacionales dentro del D.F. como estrategia mitigatoria en el caso del desperdicio masivo de agua y la nula reutilización de las aguas residuales, además de verificar la rentabilidad del sistema se toman en cuenta aspectos jurídicos que le permitan generar una plusvalía a dichas viviendas ya que durante varios años se han visto afectadas inundaciones que han mermado su infraestructura y devaluado su valor comercial.

CALIDAD DEL AGUA

El pH en los sistemas de tratamiento influye de manera determinante en la dirección de las reacciones y procesos, que incluyen intercambio de cationes, el fraccionamiento de las formas ionizadas y sin ionizar de ácidos y bases, la solubilidad además de la transformación biológica, dichas reacciones son menos eficaces si es demasiado alto o demasiado bajo. El pH que presentó el agua del influente fue de 7.21 en promedio, siendo el valor mínimo registrado de 6.9, mientras que el valor máximo alcanzó un pH de 7.35. Respecto al efluente, el pH presentó un promedio de 7.08 con valores mínimos de 6.9 y un valor máximo de 7.12 (cuadro. 1 y 2). A pesar de dichas fluctuaciones a lo largo de los meses, se considera que el pH del sistema es favorable para los procesos de asimilación de nutrimentos en vegetales (Delgadillo, 2010). Las variaciones son presentadas en la figura 20, mientras que el análisis de varianza denota que no existe una variación significativa (cuadro 6).

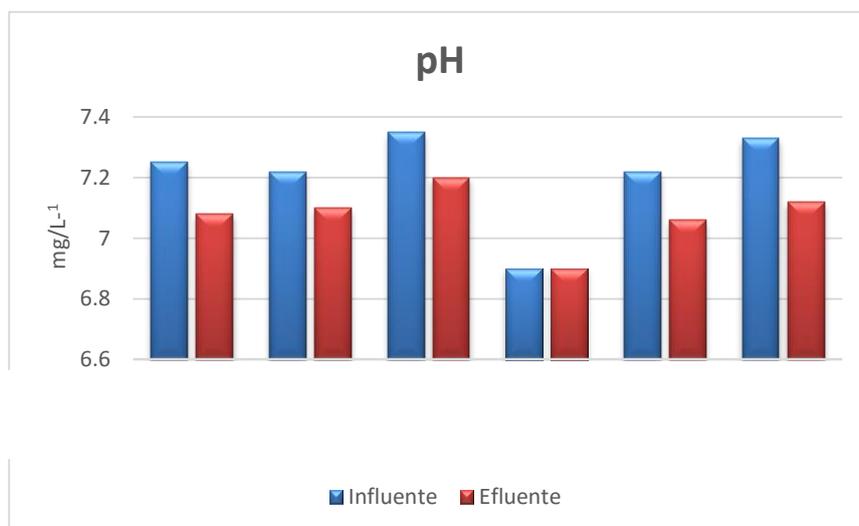


Figura 20. Comportamiento del pH durante los 6 meses de muestreo

Al oxígeno que se encuentra en el agua se le conoce como oxígeno disuelto (O.D.) y proviene de muchas fuentes, siendo la principal el oxígeno que se absorbe desde la atmósfera. En este sentido las concentraciones de O.D. en el influente presentan un promedio de 4.76 mg/L, con valores mínimos y máximos de 4.07 mg/L y 5.6 mg/L respectivamente, para el efluente, el promedio de concentración fue de 3.71 mg/L con un valor mínimo de 2.86mg/L y un valor máximo de 4.34 mg/L, Se aprecia siempre una disminución en la salida del sistema, siendo el cuarto mes donde se expresa la mayor disminución (cuadro 1). Esto se debe a que el humedal es de flujo subsuperficial por lo que el intercambio de gases con la atmósfera es casi nulo y se realizan reacciones anaeróbicas (fig. 21 y 22). Para el caso del este parámetro el análisis de varianza reveló que existe una variación significativa (cuadro 6).

Durante seis meses la temperatura en el sistema de tratamiento se mantuvo con un valor promedio de 23.32 °C en el influente, mientras que en el efluente se registró un valor promedio de 26.85 °C (cuadro 1 y 2), es importante tomar en cuenta este parámetro ya que la temperatura es factor para la velocidad de reacción en los compuestos químicos (Ramírez 2014), así como principal causante de la transición en el estado líquido a gaseoso de los compuestos que presenten mayor volatilidad (Chang 2006). Las variaciones fueron mínimas como se muestra en los cuadros 1 y 2, ya que el sistema se encontraba cubierto por el invernadero, que brindó un estado de clima controlado (Quesada & Bertsch, 2012), estabilizando la variante de temperatura (fig. 23).

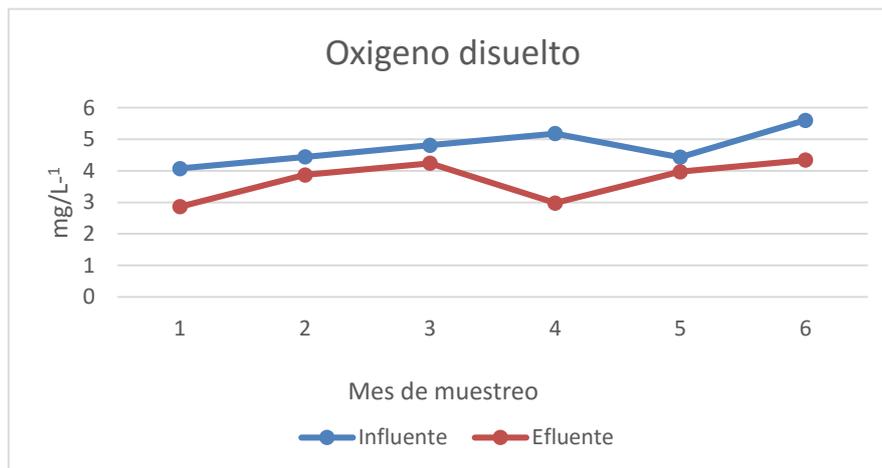


Figura 21. Comportamiento del O.D. en el sistema de tratamiento

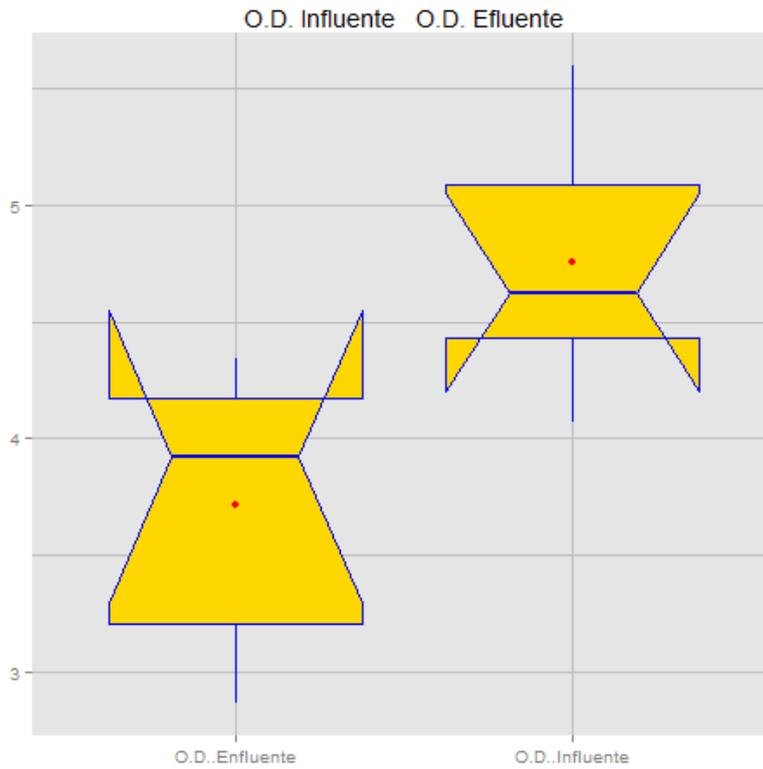


Figura 22. Diagrama de caja del O.D. en el sistema de tratamiento.

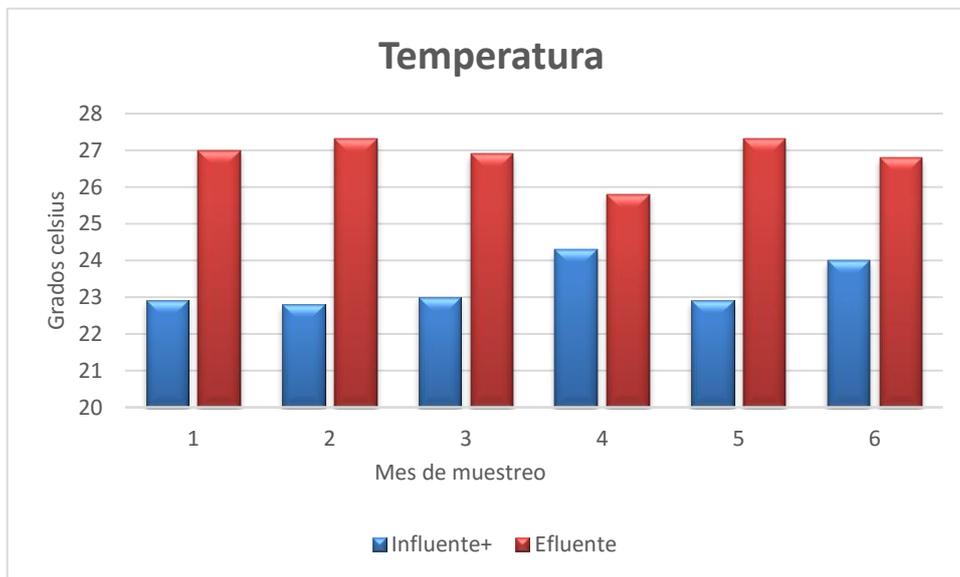


Figura 23. Comportamiento de la temperatura durante los 6 meses de muestreo

La dureza del agua del sistema registró un promedio para los seis meses en el influente de 73.5 mg/L, con una ligera disminución en promedio de 68.1 mg/L en el efluente (fig. 24, 25), en función de estos valores se considera como agua blanda y no presenta un problema para uso doméstico o de riego (Sonune y Ghate, 2004), la dureza es la concentración de todos los cationes metálicos no alcalinos presentes en solución y es un parámetro muy significativo en la calidad del agua ya que puede resultar nociva para consumo humano (Sonune y Ghate, 2004). No obstante se registró un valor de 64 mg/L en el sexto mes de muestreo que fue considerado como valor atípico ya que se encuentra muy alejado de las medidas de tendencia central, aun así, no causó incrustaciones en las tuberías del sistema. En la cuadro 10 se describe el valor de F y su valor crítico, dichos valores confirman que existe una variación significativa en las concentraciones de los datos obtenidos del influente y el efluente.

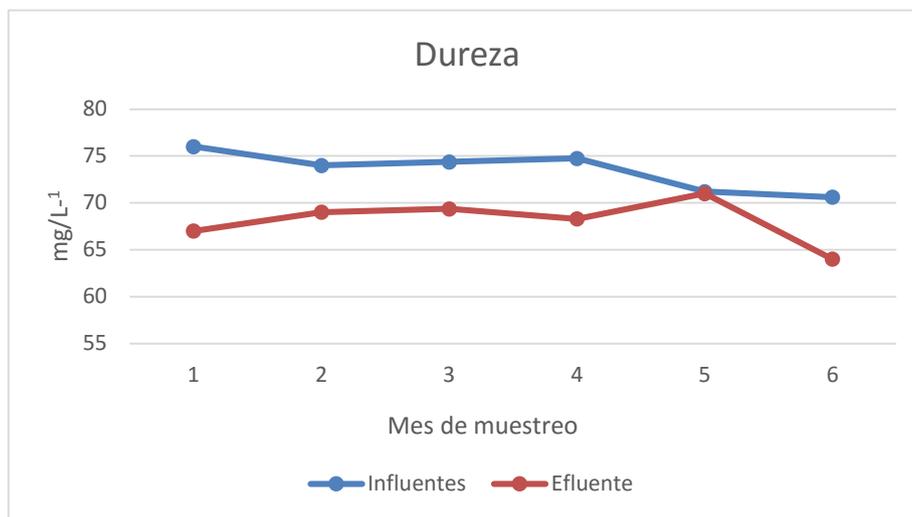


Figura 24. Comportamiento de la Dureza durante el tratamiento del agua gris

Cuadro 10. Análisis de varianza de dureza

Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
1	87.1563	16.79423237	0.002151189	4.964602744
10	5.189656667			
11				

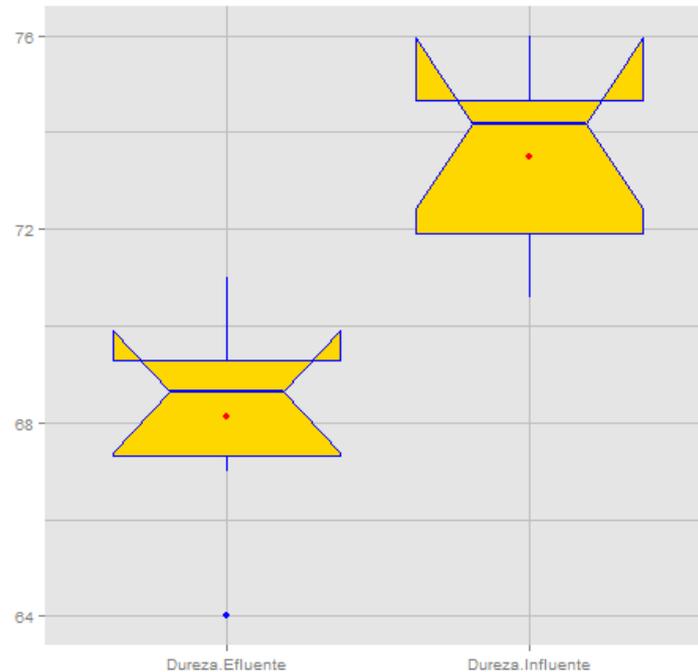


Figura 25. Diagrama de caja de la dureza en el sistema de tratamiento.

Para el particular caso de este sistema la presencia de cloro total (CL) mostró concentraciones promedio de 0.6 mg/L para el caso del influente, mientras que en el efluente se registraron valores en promedio de 0.4 mg/L., el cloro usualmente es utilizado como desinfectante; el conjunto del cloro combinado y cloro libre da como resultado el cloro total (Delgadillo, 2010). La caja de distribución muestra que los datos nos son muy variables en el influente (fig. 26 y 27), mientras que en el efluente la variación es menor y la media y mediana están ligeramente separadas, esto puede ser a consecuencia del uso de hipoclorito de sodio (NaClO) para la limpieza de los fregaderos de la vivienda como medida de higiene. La importancia de evaluar estos elementos radica en que, si bien contribuyen a la eliminación de bacterias coliformes, también afectan al resto de los microorganismos que llevan a cabo procesos de remoción de materia orgánica sin mencionar que es un nutriente fundamental para los vegetales (Quesada & Bertsch, 2012). El conjunto de datos recabados muestra que la diferencia de varianzas para este parámetro no muestra ser estadísticamente significativa (cuadro 6), se puede atribuir a los bajos niveles de cloro.

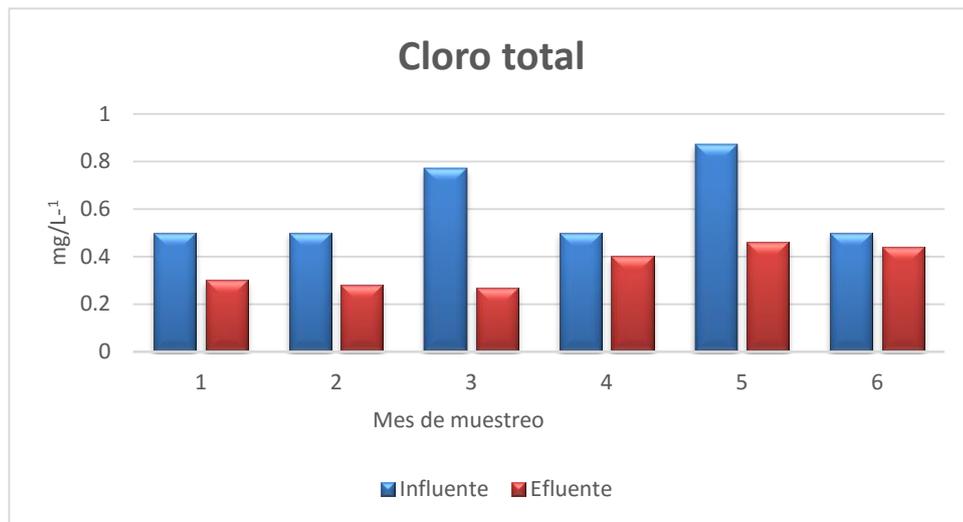


Figura 26. Comportamiento del cloro durante los seis meses de muestreo.

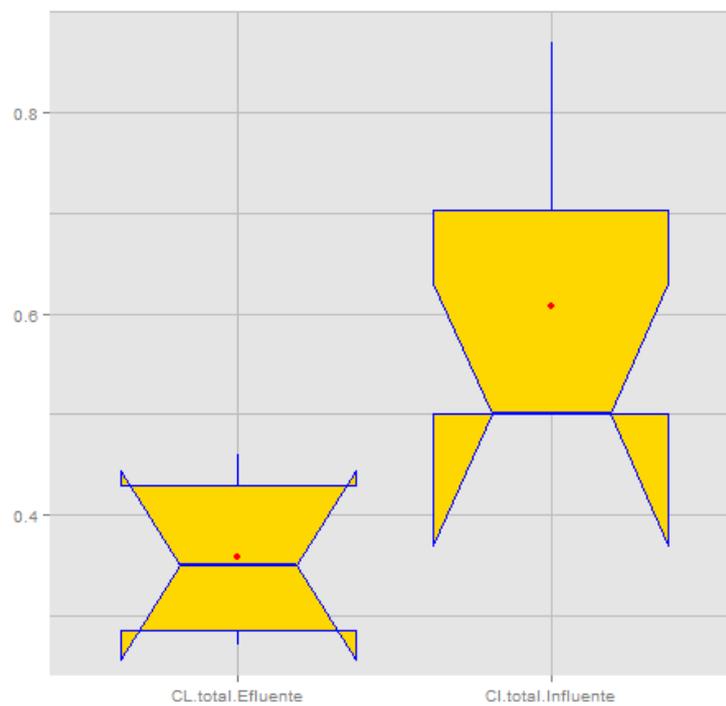


Figura 27. Diagrama de caja de cloro en el sistema de tratamiento.

Durante el semestre de muestreo se observaron valores bajos en la conductividad eléctrica del influente y el efluente, que se puede atribuir a que el agua residual que fue tratada tiene una cantidad mínima de iones en solución (Ramírez, 2014). Se considera que el agua doméstica tiene un rango de conductividad que va desde los 0.500 a los 0.800 mS/cm², sin embargo los valores que se registraron en el influente y en el efluente, tienen una concentración promedio de 0.1600 mS/cm² y 0.1300 mS/cm² respectivamente (fig. 28), se considera que estos valores se deben a la baja concentración de diversos iones entre los que se puede mencionar a los nitratos, el cloruro y el fosfato, además del sodio y el calcio Ca (Ramírez, 2014). La dispersión de los datos resulto ser asimétrica negativa, mostrando una menor variabilidad en los valores del efluente, no obstante registró un valor atípico en el primer mes de muestreo, esto se puede atribuir a la interacción del agua residual con las arenas y gravas del filtro (fig.29); al igual que el cloro no se presenta un valor estadístico significativo en el análisis de varianza (cuadro 11).

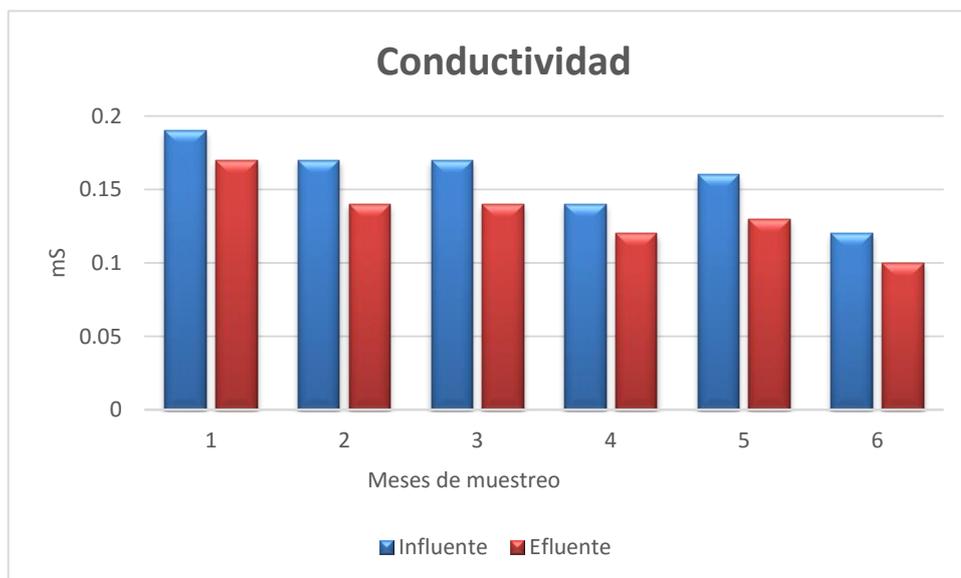


Figura 28. Valores de la conductividad del sistema de tratamiento.

Cuadro 11. Resultados de análisis de varianza de conductividad

Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
0.001875	3.223495702	0.102817939	4.964602744
0.000581667			

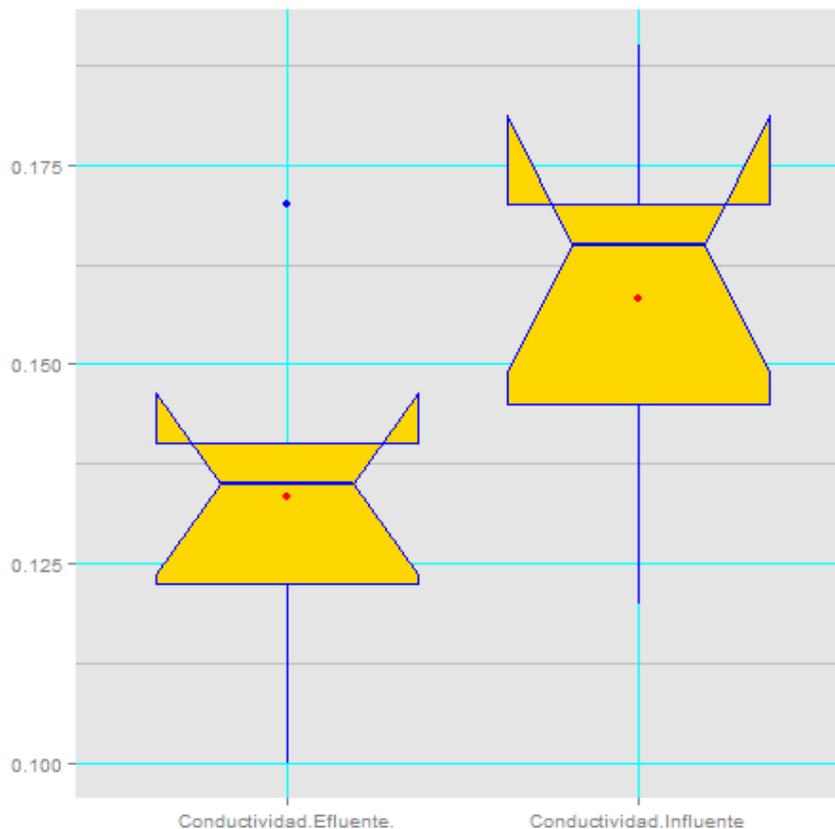


Figura 29. Diagrama de caja de conductividad eléctrica en el sistema de tratamiento.

Se cuantificaron los parámetros de cobre y cianuro, ya que el cobre es un metal de alto interés en calidad de agua de consumo porque tiene un doble carácter, es un metal esencial para el ser humano y puede, tanto por deficiencia como por exceso, producir efectos perjudiciales en la salud. El carácter esencial del cobre deriva de su incorporación a un gran número de proteínas con fines catalíticos y estructurales. Su toxicidad bioquímica, cuando supera el control homeostático, deriva de sus efectos en la estructura y función de variadas biomoléculas (Sancha, 2002). Por otro lado el grado de toxicidad del cianuro de hidrógeno (HCN) para los humanos depende del tipo de exposición. Como el cuerpo humano reacciona de formas diversas a una misma dosis, se considera que la toxicidad de una sustancia está expresada como la concentración o dosis que resulta letal para el 50% de los individuos expuestos (LC_{50} o LD_{50}). La concentración letal de cianuro de hidrógeno gaseoso (LC_{50}) es de 100-300 partes por millón. La inhalación de esos niveles de cianuro causa la muerte en 10 a 60 minutos, teniendo en cuenta que mientras más alta es la concentración más rápido se produce la muerte. La inhalación de 2.000 partes por millón de cianuro hidrogenado puede ser fatal en tan solo un minuto. El valor LD_{50} por ingestión del cianuro de hidrógeno es de 50-200 miligramos, o de 1-3 miligramos por kilo de peso. En contacto con la piel normal, el valor LD_{50} es de 100 miligramos por kilo de peso. No obstante en el sistema de tratamiento las concentraciones registradas para estos dos parámetros estuvieron muy por debajo de las que se consideran dañinos para la salud (Sancha, 2002),

presentando valores máximos de 2.04 mg/L para el caso del cobre (Cu) en el influente y 1.39 mg/L en el efluente. Proyectando una remoción del 69.1 % de dicho metal. Mientras que el cianuro tiene una concentración máxima registrada de 0.004 mg/L para el influente y una concentración máxima de 0.0001 mg/L en el efluente (cuadro 1y 2).

En el sistema de tratamiento las concentraciones que competen a los compuestos derivados del nitrógeno mostraron niveles bajos, en la química del agua, los compuestos del nitrógeno, nitrógeno amoniacal (NH_4^+), nitritos (NO_2^-), nitratos (NO_3^-) y nitrógeno orgánico, representan un papel muy importante puesto que son ellos los verdaderamente responsables del crecimiento de los organismos animales y vegetales en el medio acuático (Vitousek *et al.*, 2014). para el caso del nitrógeno amoniacal (NH_4^+) registró un promedio de 0.82 mg/L y un valor máximo de 1.2 mg/L en el influente, mientras que en el efluente la concentración promedio fue de 0.52 mg/L alcanzando un valor máximo de 0.62 mg/L (fig. 30); las concentraciones de nitritos (NO_2^-) en el influente alcanzaron un máximo de 0.000081 mg/L y un mínimo de 0.00007 mg/L, la media para las concentraciones de este parámetro es igual a 0, no obstante es válida dado que los valores están alrededor de 0 (fig. 31); en el caso de los nitratos (NO_3^-) la concentración máxima para el influente fue de 0.046 mg/L promediando durante los seis meses de muestreo 0.04 mg/L, el efluente alcanzo una concentración máxima de 0.28 mg/L con un promedio de 0.2 mg/L (fig. 32), El nitrato (NO_3^-) proviene del nitrógeno orgánico-amoniacal, el cual, al entrar en contacto con el oxígeno disuelto (O.D.), se transforma por oxidación en nitritos (NO_2^-) y posteriormente a nitratos (NO_3^-). Este proceso de nitrificación depende de la temperatura, del contenido de oxígeno disuelto y del pH del agua. La dispersión de los datos para el caso del nitrógeno amoniacal (NH_4^+) muestra un leve variabilidad en las concentraciones que presentó el efluente y la media está casi en el mismo punto que la mediana, por otro lado la variación en los datos de las concentraciones del efluente son mayores y tienden a estar por arriba del valor de la media (fig. 33). Para el caso de los nitratos (NO_3^-) es en el influente donde las concentraciones muestran mayor variabilidad con respecto a la media pero las medidas de tendencia central se encuentran sobre el mismo punto, en contraste con las concentraciones del efluente que son menos variables (fig. 34).

En conjunto, se encontró una diferencia estadística significativa entre las concentraciones del influente y las del efluente para los parámetros Nitritos y Nitratos a pesar de las bajas concentraciones registradas (cuadro 12).

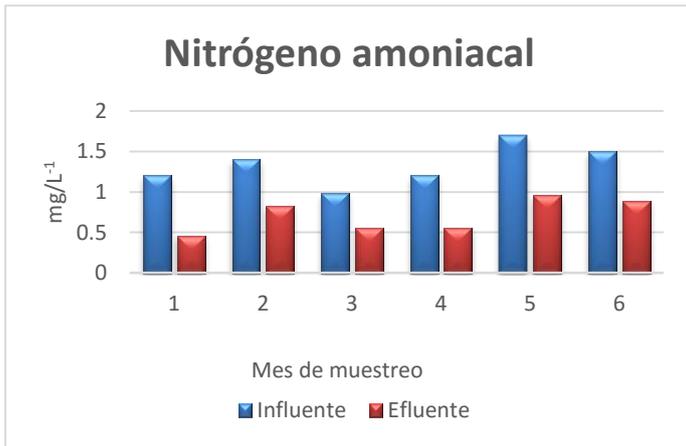
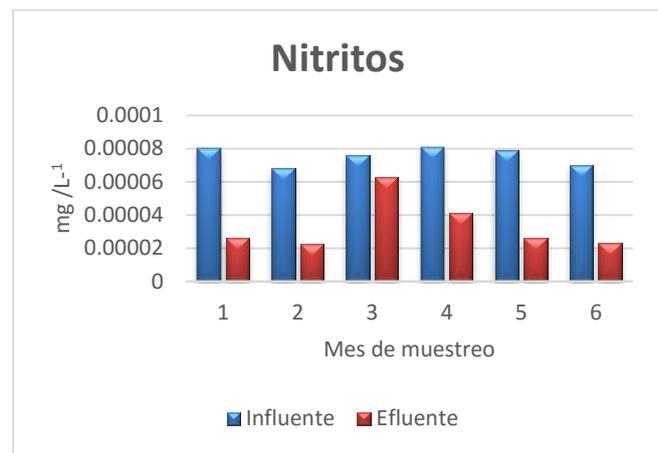
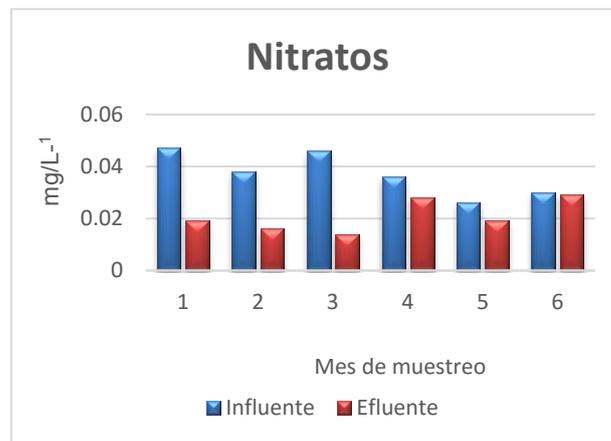


Figura 30. Concentraciones nitrógeno amoniacal

Figura 31. Concentraciones del NO₂⁺.Figura 32. Concentraciones de los NO₃⁻.

Cuadro 12. Valores de F y críticos de F para nitritos y nitratos

Parámetro	Valor de F	Valor crítico de F
Nitritos NO ₂	37.27955737	4.964602744
Nitrato NO ₃	14.61351187	4.964602744

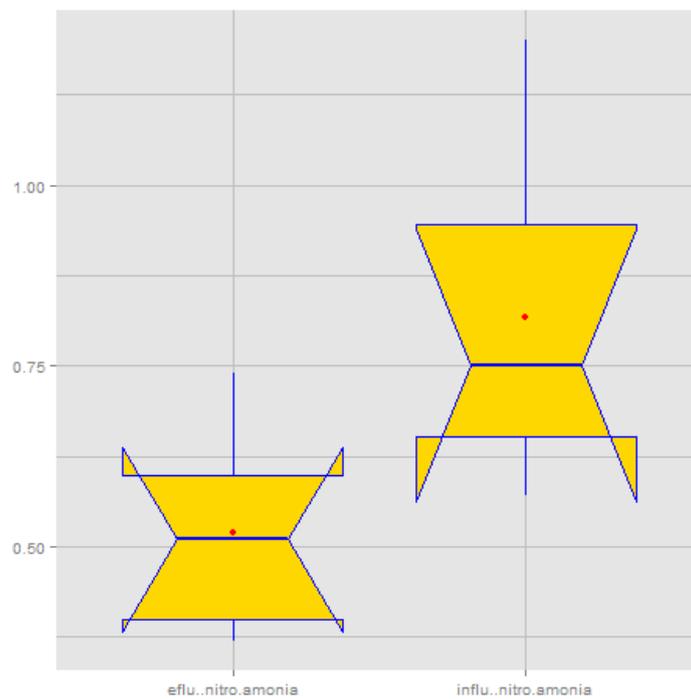


Figura 33. Diagrama de caja del nitrógeno amoniacal.

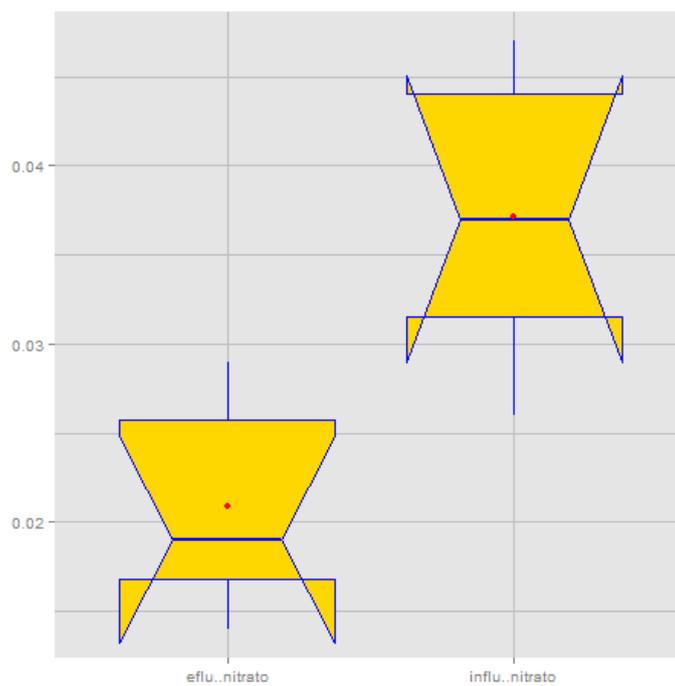


Figura 34. Diagrama de caja de los nitratos.

El fósforo se encuentra generalmente en aguas residuales tratadas, como ortofosfato (PO_4^{-3}) siendo un elemento esencial para el crecimiento biológico, sin embargo, el exceso de este nutriente trae como consecuencia efectos secundarios como la eutrofización en los sistemas de tratamiento, ya que conduce a la proliferación de algas y otros problemas de calidad del agua (Cartró, 2003). Las concentraciones presentes en el sistema de tratamiento muestran que en durante los seis meses de monitoreo, siempre fueron menores en el efluente como se muestra en la figura 35 que representa el comportamiento de los ortofosfatos (PO_4^{-3}), el máximo nivel de remoción estuvo presente en el tercer mes de tratamiento donde se alcanzó el valor máximo de concentración para el influente que registro 1.78 mg/L, ya para la salida la concentración fue de 0.88 mg/L, esto se atribuye a una buena asimilación de las plantas que pertenecen al humedal del sistema de tratamiento (Cartró, 2003). Según el análisis de varianza, el valor de F para ortofosfatos resulto ser mayor al valor crítico de F y mayor que 0.05 afirmando que hay una diferencia significativa entre las concentraciones del influente y el efluente (cuadro 13).

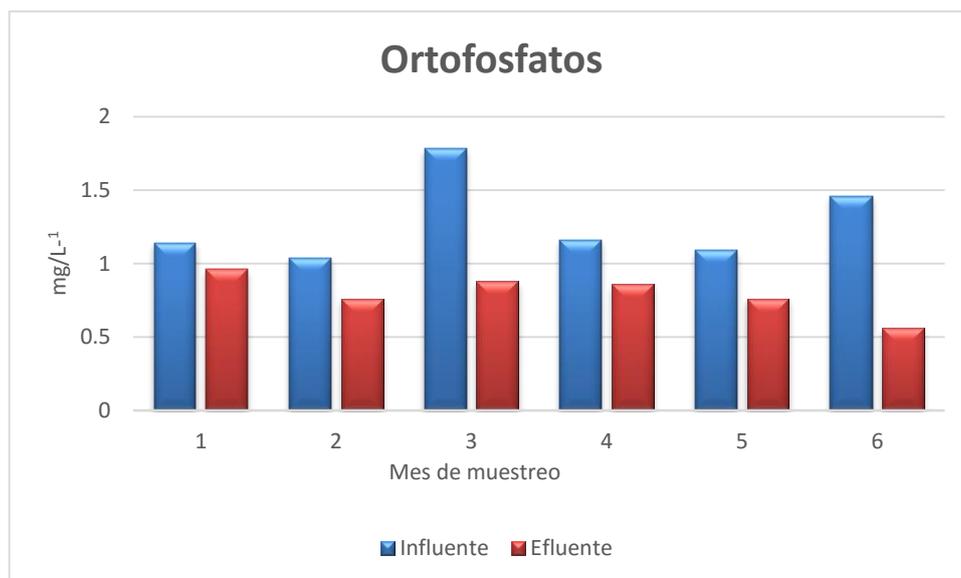


Figura 35. Concentraciones de ortofosfatos durante los seis meses de tratamiento.

Cuadro 13. Análisis de varianza de las concentraciones de ortofosfatos del influente y efluente

<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
0.696008333	13.74378805	0.004059596	4.964602744
0.050641667			

Las concentraciones de DQO del influente se mantuvieron por arriba de los 100 mg/L (fig. 36), siendo el cuarto mes donde registró la concentración máxima que fue de 146 mg/L con un promedio de 121.50 mg/L durante los seis meses, en el influente se expresa un clara reducción en las concentraciones, que se deben a los efectos combinados entre el tiempo de retención hidráulica, la acción filtrante del sistema (filtro y humedal) y la actividad biológica. Dando como resultado una concentración promedio de 107.50 mg/L, no obstante en la escala de la clasificación de Demanda Química de Oxígeno (cuadro 14), se le clasifica al agua como contaminada (CONAGUA, 2010). Este parámetro no es recomendable para las aguas potables debido al valor tan bajo que se obtendría (González, 2006).

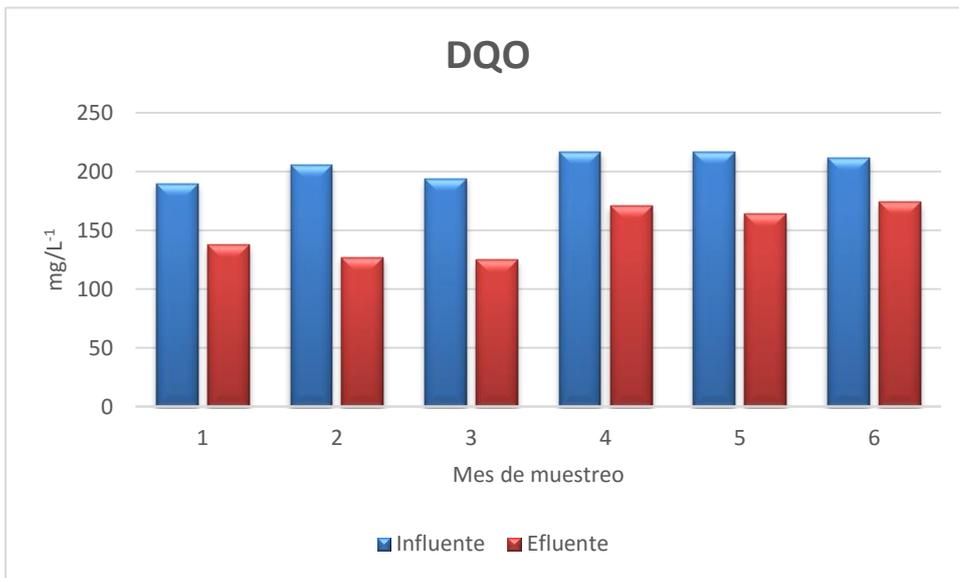


Figura 36. Comportamiento de la DQO en el sistema de tratamiento

Cuadro 14. Escala de clasificación de la DQO, fuente CONAGUA 2015.

CRITERIO	CLASIFICACIÓN	COLOR
DQO ≤ 10	EXCELENTE No contaminada	AZUL
10 < DQO ≤ 20	BUENA CALIDAD Aguas superficiales con bajo contenido de materia orgánica biodegradable y no biodegradable	VERDE
20 < DQO ≤ 40	ACEPTABLE Con indicio de contaminación. Aguas superficiales con capacidad de autodepuración o con descargas de aguas residuales tratadas biológicamente	AMARILLO
40 < DQO ≤ 200	CONTAMINADA Aguas superficiales con descargas de aguas residuales crudas, principalmente de origen municipal	NARANJA
DQO > 200	FUERTEMENTE CONTAMINADA Aguas superficiales con fuerte impacto de descargas de aguas residuales crudas municipales y no municipales	ROJO

La Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) es un método analítico que determina la cantidad de oxígeno consumido en la degradación bioquímica de la materia orgánica en el agua (Cruz, 2013). Las concentraciones de DBO para el caso del influente se colocaron dentro de la categoría contaminada según la escala de CONAGUA 2015, ya que promediaron 45.17 mg/L de DBO, mientras que en el efluente el promedio fue de 26.17 mg/L, siendo el segundo mes donde se alcanzó la mayor remoción, registrando una concentración de 19 mg/L de DBO (fig. 37), que según la NOM-003-SEMARNAT-1997 puede ser reutilizada al público con contacto directo, sin embargo, el promedio de las concentraciones durante los 6 meses colocan al agua del efluente como aceptable según la escala de CONAGUA (cuadro 15).

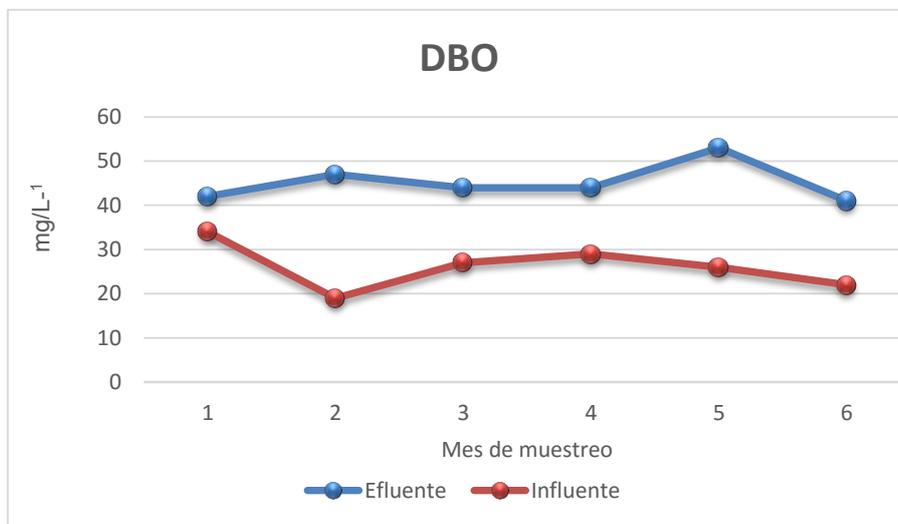


Figura 37. Comportamiento de la DBO en el sistema de tratamiento.

Cuadro 15. Escala de clasificación de la DBO, fuente CONAGUA 2015.

CRITERIO	CLASIFICACIÓN	COLOR
$DBO_5 \leq 3$	EXCELENTE No contaminada	AZUL
$3 < DBO_5 \leq 6$	BUENA CALIDAD Aguas superficiales con bajo contenido de materia orgánica biodegradable	VERDE
$6 < DBO_5 \leq 30$	ACEPTABLE Con indicio de contaminación. Aguas superficiales con capacidad de autodepuración o con descargas de aguas residuales tratadas biológicamente	AMARILLO
$30 < DBO_5 \leq 120$	CONTAMINADA Aguas superficiales con descargas de aguas residuales crudas, principalmente de origen municipal	NARANJA
$DBO_5 > 120$	FUERTEMENTE CONTAMINADA Aguas superficiales con fuerte impacto de descargas de aguas residuales crudas municipales y no municipales	ROJO

CALIDAD DEL SUSTRATO

El suelo es un sistema complejo y heterogéneo compuesto por la mezcla de diversos materiales sólidos, líquidos y gaseosos, además de microorganismos. Estos materiales brindan a los vegetales un gran número de nutrimentos que pueden favorecer su crecimiento, no obstante, la ausencia o la saturación de estos nutrimentos en los suelos de cultivo pueden afectar seriamente los procesos de fotosíntesis y causar malformaciones en las partes vegetativas o reproductivas de las plantas (Rioja, 2002). El sustrato que se utilizó para el cultivo en invernadero resultó ser medianamente básico con un pH promedio de 7.765 en sustrato no irrigado y un promedio de 7.88 en el irrigado, esto es favorable para el crecimiento de los vegetales ya que no afecta la capacidad de intercambio catiónico (CIC), facilitando la disponibilidad de nutrimentos (Rioja, 2002), se observa un leve aumento en la cantidad de bicarbonatos en el sustrato irrigado, que pasó de un promedio de 16 mmol/L en el suelo sin irrigar a un promedio de 19 mmol/L en el irrigado, en el caso de los cloruros, existió un aumento considerable en el promedio del sustrato no irrigado (8.25 mmol/L), en comparación con el sustrato irrigado (11.5 mmol/L), esto a consecuencia de que el cloro es uno de los elemento más abundante en las aguas para riego y propicia la formación de dichos compuestos (USDA, 1999), finalmente la presencia de carbonatos en el sustrato no irrigado, registró un promedio de 10 mmol/L, mientras que, el irrigado exhibió 9 mmol/L en promedio, no obstante los valores de la "Z" e "Y" siempre fueron mayores en el momento del cálculo (revisar anexo 1), por lo que se considera que hay un aumento mínimo en la cantidad de carbonatos, estos valores se exhiben en las figuras 38 y 39 respectivamente. En función de estos resultados se considera que el sustrato aumenta la concentración de estos elementos a consecuencia del riego con el agua que proviene del efluente, no obstante, la concentración registrada no se considera nociva (Rioja, 2002).

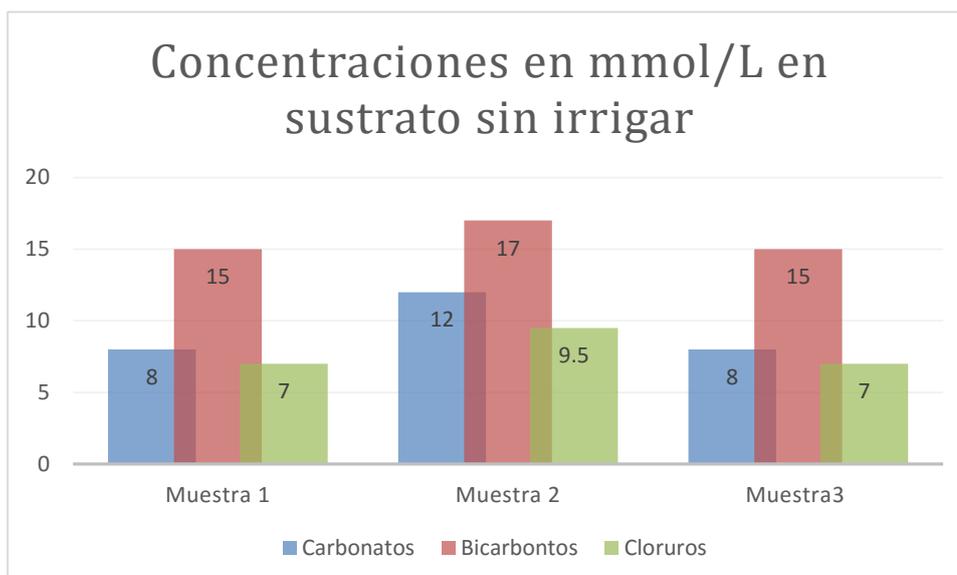


Figura 38. Valores de los parámetros de la calidad del sustrato no irrigado con el agua del efluente.

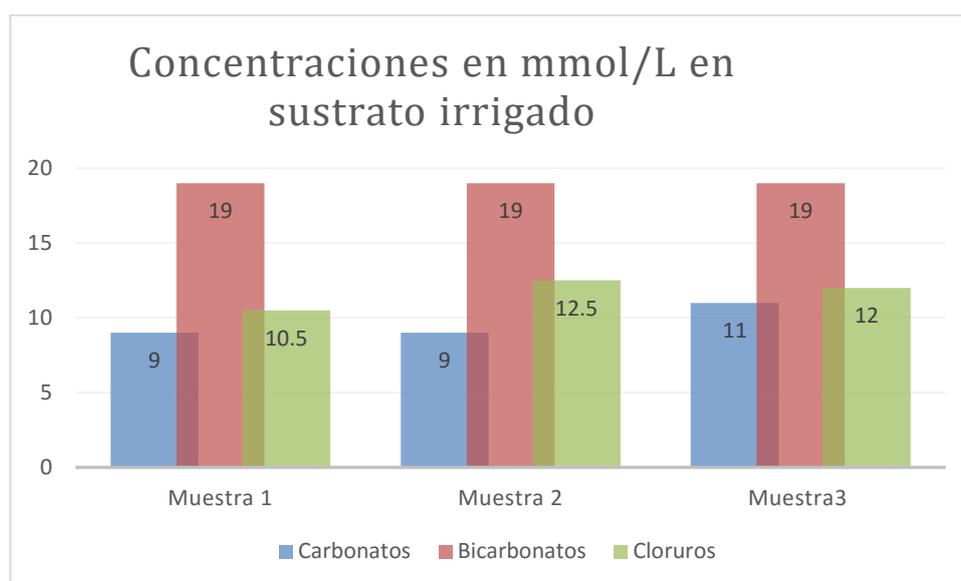


Figura 39. Valores de los parámetros de la calidad del sustrato irrigado.

CRECIMIENTO VEGETAL

El crecimiento es un aumento constante en el tamaño de un organismo, acompañado de procesos como la morfogénesis y la diferenciación celular, se define que el crecimiento de los diferentes órganos de las plantas, es un proceso fisiológico complejo, que depende directamente de la fotosíntesis, la respiración, la división celular, la elongación, la diferenciación, entre otros, y que además está influenciada por factores como temperatura, intensidad de luz, densidad de población, calidad de la semilla, disponibilidad de agua y de nutrientes (Lang, 1997; Reigosa *et al.*, 2004).

Los vegetales irrigados con el agua resultante del sistema de tratamiento, muestran un crecimiento adecuado y sin déficit de nutrientes, ya que ningún vegetal muestra alteraciones en su coloración, malformaciones o rasgos de alteración por contaminación del sustrato como se presenta en la documentación fotográfica (fig. 40, 41, 42).

En cuanto a su crecimiento, la especie *Cucurbita pepo* presentó un área foliar máxima que presentó el cultivo fue de 308 cm² para el día 69 después del trasplante, y una masa seca máxima de 16.98g para el mismo día (cuadro 7). Eventualmente la aparición del fruto dio lugar al marchitar de la mayoría de los vegetales. Se colectaron un total de 17 frutos con un peso conjunto de 13.480 kg y fueron consumidas posteriormente.



Figura 40. Registro fotográfico de *Cucurbita pepo*. en diferentes estadios fenológicos

La especie *Lactuca sativa* presentó mayor cantidad de plántulas germinadas en comparación con los otros cultivos. La cobertura del área foliar de *Lactuca sativa* alcanzó el valor máximo de 66.87 cm² a los 69 días después del trasplante, la masa seca fue aumentando en función a los días, dando lugar al aumento de área foliar que dato un valor máximo de 51.14 cm² (cuadro 7).

Finalmente se obtuvieron 59 piezas de este cultivo vegetal de 80 cm de altura que fueron puestas a la venta entre la comunidad, con un valor de 30 pesos por pieza.



Figura 41. Registro fotográfico de *Lactuca sativa* en diferentes estadios fenológicos

En el caso de la especie *Lycopersicon esculentum cv Naomi F1*, se comenzaron a tomar los datos de crecimiento a partir del día 23 ya que la germinación de dicha especie es más lenta en comparación con las anteriores especies (Velasco & Nieto, 2005), el cultivo además fue el que más cobertura foliar alcanzó con un máximo de 393.21 cm² para el día 79 después del trasplante (cuadro 9), se obtuvieron 19.780 kg al final del proyecto que fueron consumidos, vendidos en 13 pesos por kilogramo y regalados entre la comunidad.



Figura 42. Registro fotográfico de *lycopersicon esculentum cv Naomi F1*. En diferentes estadios fenológicos

Finalmente la respuesta de los ejemplares de *Anthurium andreanum* y *Zantedechia Aethiopica* tuvo éxito ya que durante los 6 meses del tratamiento mantuvieron un buen aspecto, ya que no mostraron rastros de déficit de nutrimentos, así como tampoco malformaciones o alteraciones por presencia de alguna sustancia nociva. Todos los ejemplares de ambas especies presentaron floración, para el caso de la especie *Anthurium andreanum* tardó en aparecer 5 meses con 3 semanas y para la especie *Zantedechia Aethiopica* la floración de la mayoría de los ejemplares se presentó en el tercer mes de tratamiento (fig.43).

Para el caso de estas dos especies se ha comprobado que son eficientes para su uso en humedales artificiales (Seba, 2013), no obstante la especie *Anthurium andreanum* requirió de un malla sombra adicional al hule del invernadero para que el vegetal pudiera continuar con su desarrollo ya que es sensible a fotoperiodos constantes.



Figura 43. Establecimiento de las plantas del humedal, derecha. *Zantedechia Aethiopica*, izquierda *Anthurium andreanu*.

IX CONCLUSIONES

- Los parámetros de calidad del agua gris tratada del efluente del sistema de tratamiento refleja bajos niveles de contaminantes y están dentro de los límites máximos permisibles de la NOM-002-SEMARNAT-1996
- El agua del efluente no causó un impacto negativo o de relevancia en la calidad del sustrato dado que las concentraciones de carbonatos, bicarbonatos y cloruros presentes en el mismo son bajas
- El agua resultante del tratamiento mostró ser de utilidad para la irrigación de los cultivos.
- El sustrato con el que se cultivaron los vegetales es moderadamente básico no obstante facilitó el desarrollo de los vegetales.
- El efluente cumple con la NOM-003-SEMARNAT-1997 puede ser reutilizada al público con contacto directo.

X RECOMENDACIONES

- Aunque la calidad del agua del efluente registró estar dentro de los estándares legales, se recomienda hacer un análisis exhaustivo donde se evalúe también el parámetro coliformes fecales y huevos de helminto.
- Evitar la cercanía del cultivo de jitomate con algún otro, ya que por su carácter rastroso podría resultar invasivo
- Para una mejor respuesta de las especies *Anthurium andreanum* y *Zantedechia Aethiopica* se recomienda utilizar malla sombra adicional al polietileno ya que son sensibles a fotoperiodos largos.
- Se recomienda realizar muestreos periódicos al sustrato para verificar que no exista una futura salinización.

LITERATURA CITADA

1. Alcocer M, Coria I. & Vera M. (2012), Las aguas jabonosas, manual de buenas prácticas, instituto carlos slim de la salud, Malinalco Estado de México. 67-77.
2. Alcocer M., (1995), Aguas Residuales Urbanas: Tratamientos Naturales De Bajo Costo Y Aprovechamiento, Mundi-Prensa, Madrid. 1-16
3. Aquarec, (2006), Reclamation and reuse of municipal wastewater in europe – current status and future perspectives analysed by the AQUAREC research Project. 128-240 pp.
4. Bernat CJ. (1990), Invernaderos: construcción, manejo y rentabilidad. Editorial aedos, España, 143.
5. Barker-Reid, F., Grant A., Harper & Andrew J. Hamilto. (2009), Affluent effluent: growing vegetables with wastewater in melbourne, australia—a wealthy but bone-dry city. Springer Science + Business Media B.V.
6. Brix H. (1994), Use of constructed wetland in water pollution control: historical development, present status, and future perspectives. Water Sciences Technology vol. 40 # 3.
7. Carabias, J. (2005). AGUA, Medio ambiente y sociedad. hacia la gestión integral de los recursos hídricos en México, UNAM-COLMEX-Fundación Gonzalo Río Arronte, México. 6 pp.
8. Catró, J. (2003), Tratamiento de aguas industriales. Depuración biológica de las aguas residuales, Ed. Fundación Universitaria Iberoamericana –Universidad de Catalunya, Barcelona.
9. CHANG, R. (2006), Principios esenciales de química general, Cuarta edición, McGraw-Hill, Madrid, pp. 617-760.
10. Chenoweth J. & Pedley S. (2014), Drawer compacted sand filter: a new and innovative method for on-site grey water treatment. Centre for Environmental Strategy, University of Surrey, Guildford, Surrey GU2 7XH, UK.

-
-
11. CONSTITUCIÓN POLITICA DE LOS ESTADOS UNIDOS MEXICANOS, Título primero, Capítulo I de las Garantías Individuales, Artículo 27, México.
 12. CONAGUA (2015), Indicadores de la calidad del agua en México, 113-127 pp.
 13. CONAGUA (2015), Estadísticas del agua en México, Edición 2015, 111-167 pp.
 14. Cruz M. P. (2013), Calidad del agua en la laguna de Coyuca, Guerrero y geovisualización de los paisajes asociados, Facultad de Estudios Superiores Zaragoza.
 15. Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de Norteamérica (USDA) (1999), Guía para la evaluación de la calidad y salud del suelo.
 16. Duran, N. P.; Osorio, A.; García, I. M. (2003), Evaluación de la remoción de cromo hexavalente y zinc en agua residual sintética utilizando humedales de flujo subsuperficial plantados con typha, junco y heliconia usando como medio soporte arena y grava. Tesis. Universidad Tecnológica de Pereira. Escuela de Química. Programa en Química Industrial.
 17. Escalas A. (2006), Tecnologías y usos de las aguas residuales en México, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de San Luis Potosí. 6pp
 18. Escamilla M. (2007), Teorema ambiental, Revista No. 61, EDIFICIOS VERDES, Reciclaje de agua residual urbana, 26 pp
 19. Eriksson E, Auffarth K, Henze M., & Ledin A. (2002). Characteristics of grey wastewater. Urban Water; 85-104
 20. Espinoza T. (2004), Modelo cualitativo de indicadores ambientales para el análisis de escenarios pesqueros: caso de estudio el norte del golfo de California, Universidad Autónoma de Baja California Facultad de Ciencias Marinas Instituto de Investigaciones Oceanológicas, 41 pp.

-
-
21. Fabeles-Patrón J.L., & Hoogesteijn A. (2010), Evaluación preliminar de la eficiencia en las lagunas de oxidación de la ciudad de Mérida, Yucatán. Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del I.P.N. Artículo de Divulgación 127-137.
 22. Gabarro J, Batchelli L, Balaguer MD, Puig S, Colprim J (2013). Greywater treatment at a sport centre for reuse in irrigation: a case study. *Environ Technol.* 1385–1392.
 23. González, I. (2006). Establecimiento y determinación de índices de calidad del agua. enfoque basado en lógica difusa. Universidad de los Andes. Facultad de Ingeniería Escuela de Ingeniería de Sistemas. Departamento de Investigación de Operaciones. 133 pp.
 24. Gordon E. & Feo Y. (2009). Dinámica del nitrógeno en un humedal herbáceo dominado POR *HYMENACHNE AMPLEXICAULIS*. *Acta botánica Venezuela.* 32(2): 311-331
 25. Guido-Zárata, A., & Durán-de-Bazúa, C (2008). Remoción de contaminantes en un sistema modelo de humedales artificiales a escala de laboratorio. *Tecnología, Ciencia, Educación,* 23(1), 15-22.
 26. Haro G. ME. (2004). Evaluación de un humedal artificial como tratamiento de agua residual en un asentamiento irregular.
 27. Haro G. ME. y Aponte H.N.O., 2010; TESINA Evaluación de un humedal artificial como tratamiento de agua residual en un asentamiento irregular.
 28. Hammer, D.A. (1989), *CONSTRUCTED Wetlands for wastewater treatment: municipal, industrial and agricultural.* Lewis Publisher, Chelsea, MI.
 29. Herrera I., Martínez R., Hernández G. (1989), “Contribución para la administración científica del agua subterránea de la cuenca de México”, *Revista de Geofísica internacional,* 28 (2): 297-334
 30. Instituto de acceso a la información pública y protección de datos personales del Distrito Federal. (2012), expediente RR.SIP.1948/2012.
 31. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, Estadística. (INEGI). (2013) A propósito del día mundial del agua. .

-
-
32. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI). (2012) Disponibilidad de agua en México, estadística y comparación mundial. 14-16.
33. Jarabo F., Elortegui E. & Jarabe U. (2000), Fundamentos de tecnología ambiental, Primera Edición, Editorial Neografis, S.L. Impresores, 69, 75-85 pp.
34. Jiménez-C B, Mazari-H M, Domínguez-M R, & Cifuentes-G E. (2008) El agua en el valle de México. 2-18.
35. Kadlec R.H. (2009). Comparison of free water and horizontal subsurface treatment wetlands, Elsevier, Ecological Engineering 35:159-174
36. Lang, G. A. (1997). Physiology, biochemistry and molecular biology. Wallingford : CAB International. Ed. Plant dormancy
37. LEY DE AGUAS NACIONALES, (2015) Diario Oficial de la Federación, Título Quinto zonas reglamentadas, de veda o de reserva Capítulo único, artículo 45, Título Séptimo prevención y control de la contaminación de las aguas Capítulo único, artículo 87.
38. LEY GENERAL DE EQUILIBRIO ECOLÓGICO Y LA PROTECCIÓN AL AMBIENTE, (2000), Título Cuarto Protección al Ambiente, Capítulo III Prevención y Control de la Contaminación del Agua y de los Ecosistemas Acuáticos, Artículo 122.
39. Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente. Reformas DOF 28-01-2011.
40. LEY GENERAL DE SALUD (APARTADO DE AGUA) (2000), Título Séptimo, Promoción de la Salud, Capítulo IV, Efectos del Ambiente en la Salud, artículo 122.
41. Limón M. JG. (2013), Los lodos de las plantas de tratamiento de aguas residuales, ¿problema o recurso?, Universidad Autónoma de Jalisco Facultad de Química, 45pp.
42. López A. (1990), Abastecimiento de agua potable y disposición y eliminación de excretas, Instituto Politécnico Nacional, 255, 290 pp.

-
-
43. López F. (2008), Tratamiento de las aguas residuales en el distrito federal, Periódico El Sol de México, Sección Metrópoli, 15 pp.
 44. López M. S. (2011). Diseño, construcción y mantenimiento de humedales de flujo sub-superficial para el tratamiento de aguas residuales en los municipios de Apaxtla de Castrejón y Tetipac, Guerrero. México, D.F.
 45. Llagas C. W. A. & Guadalupe G. E., (2006). Diseño de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales en la UNMSM Revista del Instituto de Investigaciones FIGMMG. 85- 96.
 46. Martínez O. (2004), Gestión del agua en el distrito federal, retos y propuestas, Primera Edición, Editorial Solart, S.A. de C.V., 157 a 162 pp.
 47. Metcalf, Eddy (1991), Wasterwater engineering, treatment disposal reuse, Segunda edición Editorial Mac Graw Hill, 128 pp.
 48. Metcalf E. (2004) Wastewater engineering treatment disposal, REUSE. tercera Edición. McGraw-Hill. 204-211.
 49. Meza N. & Bautista D. (1999), Estimación del área foliar en plantas jóvenes de nípero (*manilkara achras*) sometidas a dos ambientes de luz. Posgrado de Horticultura, Decanato de Agronomía Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado. Venezuela
 50. Matallana A. & Montero C JI. (1995) Invernaderos: diseño, construcción y ambientación. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España.
 51. NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-002-SEMARNAT-1996, Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal. *Diario Oficial de la Federación*, México.
 52. NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-003-SEMARNAT-1997, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público

-
-
53. NOM-021-SEMARNAT-2000 (antes NOM-021-RECNAT-2000) NORMA OFICIAL MEXICANA, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. estudios, muestreo y análisis.
54. NMX-AA-028-SCFI-2001, Análisis de agua - determinación de la demanda bioquímica de oxígeno en aguas naturales, residuales (DBO5) y residuales tratadas - método de prueba (cancela a la nmx-aa-028-1981)
55. NMX-AA-030-SCFI-2001, Análisis de agua - determinación de la demanda química de oxígeno en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba (cancela a la nmx-aa 030 1981).
56. Quesada R. G., Bertsh H. F. (2012), Fertirriego en el rendimiento de híbridos de tomate producidos en invernadero sistema de posgrado, Universidad de Costa Rica agronomía mesoamericana 23(1): 117-128.
57. Palacios-Blanco, JL. (2011) La casa ecológica, como construirla. Primera edición. México, D.F. 101-170.
58. Paulo, P. L., Boncz, M. A., Asmus, A., Jonsson, H. & Ide, C. N. (2007) Greywater treatment in constructed wetland at household level. Gewässerschutz Wasser Abwasser 206(34), 1-7.
59. Ramírez G. L.E. (2014), La química del medio ambiente y de la contaminación. Impreso en México D.F.
60. Reed S.C. (1995), Natural systems for waste management and treatment. 2da edición Mcgraw Hill, New York.
61. Reigosa, M., Pedrol N., Sanchez A. (2004). La ecofisiología vegetal, una ciencia de síntesis. Madrid, 567-620 pp.
62. Rioja M. A. (2002), Apuntes de fitotecnia general, E.U.I.T.A., Ciudad Real. Chiapas México.
63. Romero R. (1999), Calidad del agua, 2da Edición, Escuela Colombiana de Ingeniería, Editorial Alfa omega, 2a edición, 69, 124 -127, 146 pp.

-
-
64. SMADF (2002), Residuos de manejo especial, Jefatura de Supervisión a Descargas, 8 pp.
65. Seba B. E. (2013), Evaluación de un sistema lagunar in situ a escala piloto para el tratamiento de aguas residuales lácteas del municipio de miahuatlán, veracruz. Facultad de ciencias químicas zona Xalapa, México.
66. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Subsecretaría de desarrollo rural (SAGARPA). Dirección general de apoyos para el desarrollo rural. (2014) INVERNADEROS RÚSTICOS. 2-12.
67. Secretaria de Comercio y Fomento Industrial (SCFI) NOM-AA-039-SCFI-2001. Análisis de agua, Determinación de sustancias activas al azul de metileno (SAAM) en aguas naturales, potables residuales y residuales tartadas. Diario oficial de la federación, 01 de Agosto de 2001. México.
68. Seidel K. (1966), Limpieza de depósitos de agua por las plantas superiores, *Instituto Max Planck*, Alemania, 53, 289-297. (traducción del alemán al español).
69. Seoanez C. (1999), Aguas residuales urbanas, tratamientos naturales de bajo costo y aprovechamiento, Editorial: Ediciones Mundi-prensa, Tomo II, 157 pp.
70. Seoanez C. (1999), Ingeniería del medio ambiente aplicada al medio natural continental, Editorial Mundi prensa, 2 Edición, 304-312, 338-349 pp.
71. Silva JP. (2011), Humedales construidos, Escuela de Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente. Universidad el Valle Colombia. 18pp.
72. Sistema de Información del Desarrollo Social (SIDESO), (2011) UNIVERSO DE UNIDADES.
73. Sonune A. & Ghate R.; 2004 Developments in wastewater treatment methods. Elsevier, Desalination 167:55-63
74. Vázquez N. (2008), En las entrañas del drenaje profundo, Revista Vértigo análisis y pensamiento de México, No. 366, 24 pp.

-
-
75. Vela E. (2007), La cuenca de México, *Revista Arqueología Mexicana* Volumen XV, Número 86, 29 pp.
76. Velasco H. E., Nieto A. R. (2005), Cultivo de jitomate en hidroponía e invernadero. Universidad Autónoma Chapingo, México
77. Vymazal J, (2009). The use constructed wetlands with horizontal sub-surface flow for various types of wastewater. Elsevier, *Ecological Engineering* 35: 1-17
78. Vymazal J., Kröpfelová L., (2009). Removal of organics in constructed wetlands with horizontal sub-surface flow: A review of the field experience. Elsevier ; *Science of the Total Environment* 407: 3911-3922
79. Winpenny J., Heinz I., Koo S., (2013) Reutilización del agua en la agricultura: ¿Beneficios para todos? Informe sobre temas hídricos FAO.
80. Vitousek P. M., Chair, John Aber, Robert W. Howarth, Gene E. Likens, Pamela A. Matson, David W. Schindler, William H. Schlesinger, & G. David Tilman. (2014). Alteración antrópogenica del ciclo global del nitrógeno: causas y consecuencias. *Ecological Society of America*.
81. Yalcuk A. & Ugurlu A. (2009). Comparison of horizontal and vertical constructed wetland systems for landfill leachate treatment. Elsevier, *Bioresource Technology* 100: 2521-2526
82. Zhang CB., Ke SS., Wang J., Ge Y., Chang XS., Chang j. & Zhu SX. (2009) Responses of microbial activity and community metabolic profiles to plant functional group diversity in a full-scale constructed wetland. A School of Life Sciences, Taizhou University, Linhai, PR China.

ANEXOS

ANEXO 1. FRAGMENTO DE LA NOM-021-SEMARNAT-2000

(Antes NOM-021-RECNAT-2000) NORMA OFICIAL MEXICANA, QUE ESTABLECE LAS ESPECIFICACIONES DE FERTILIDAD, SALINIDAD Y CLASIFICACIÓN DE SUELOS. ESTUDIOS, MUESTREO Y ANÁLISIS.

Principio y aplicación

Método para determinar los aniones solubles (cloruros, carbonatos, bicarbonatos y sulfatos) en el extracto de saturación, por titulación volumétrica, los tres primeros y por turbidimetría, el último. Los aniones que se encuentran principalmente en extractos acuosos de suelos (aniones solubles) son los carbonatos, bicarbonatos, sulfatos y cloruros y en menor cantidad nitratos, silicatos y fosfatos. Para la determinación de HCO_3^- y Cl^- se pueden utilizar métodos volumétricos con una cierta exactitud.

Reactivos

1. Ácido sulfúrico 0.05 N. Diluir 3 ml de H_2SO_4 concentrado en 100 mL de H_2O destilada y aforar a 2000mL valorado.
2. Disolución de carbonato de sodio 0.05 N. Séquese entre 3-5 g de carbonato de sodio material de referencia certificado a 250°C durante 4 h y enfríese en desecador. Pese 2.5 g y transfírase a un matraz volumétrico de 1000 mL, diluya con agua y llévase hasta la marca con agua destilada. No debe conservarse más de una semana.
3. Valoración del ácido sulfúrico 0.05 N con material de referencia certificado de carbonato de sodio. Tome 50 mL de agua, adicione 2-3 gotas de fenoftaleína hasta el vire de rosa a incoloro.
4. Fenolftaleína al 1% con etanol al 85%. Preparar 100 mL.
5. Anaranjado de metilo al 0.1% en agua destilada. Preparar 100 mL.
6. Agua destilada.
7. Cromato de potasio al 5%. Preparar 100 mL.
8. Nitrato de plata 0.025 N. Pese 4.2468 g de AgNO_3 en un matraz volumétrico de 1 L y lleve al volumen con agua.
9. Cloruro de Bario Dihidratado. ($\text{BaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).

10. Solución acondicionadora. Disolver 75 g de NaCl en 275 mL de agua destilada en un matraz de 500 mL con un agitador magnético, añadir 30 mL de HCl concentrado, 50 mL de glicerol, 100 ml etanol al 96%; aforar a 500 mL.

11. Solución estándar de sulfato de potasio (a partir de materiales de referencia certificados). Disolver 0.0871 g de sulfato de potasio (K_2SO_4) en 1000 mL de agua destilada.

Material y equipo

1. Material común de laboratorio.
2. Agitador electromagnético.
3. Fotocolorímetro.

Determinación de carbonatos

1. Tomar 5 mL del extracto de saturación en un matraz Erlenmeyer de 125 ml.
2. Agregar 15 mL de agua destilada.
3. Añadir 2 a 3 gotas de fenolftaleína.
4. Si presenta un color rosado, titular con H_2SO_4 0.05 N hasta la desaparición del color, anotar este valor como "Y".

Determinación de bicarbonatos

1. Al matraz procedente de la titulación con H_2SO_4 añadirle 3 gotas de anaranjado de metilo.
2. Seguir la titulación con el H_2SO_4 0.05 N. hasta un vire de naranja a canela. Anotar este valor como "Z".

Cálculos

$$\text{m mol}_{(-)} \text{ L}^{-1} \text{ de CO}_3^{2-} = \frac{2Y \times N \text{ del H}_2\text{SO}_4 \times 1000}{\text{mL Alícuota}}$$

$$\text{m mol L}^{-1} \text{ de H}_3^{(-)} = \frac{(Z - 2Y) \times N \text{ de H}_2\text{SO}_4 \times 1000}{\text{mL Alícuota}}$$

Determinación de cloruros

1. Tomar 5 mL del extracto de saturación en un matraz Erlenmeyer de 125 mL
2. Agregar 15 mL de agua destilada
3. Adicionar 4 gotas de indicador cromato de potasio
4. Titular con AgNO₃ 0.025 N. hasta un cambio de color de amarillo a rojo ladrillo

Cálculos

$$\text{m mol}_{(-)} \text{ L}^{-1} \text{ de Cl} = \frac{\text{mL de AgNO}_3 \times N \text{ de AgNO}_3 \times 1000}{\text{mL Alícuota}}$$

Principio y aplicación

Método para determinar los cationes solubles (Ca, Mg, Na y K) en el extracto de saturación por medición en un aparato de absorción atómica (Ca y Mg) y en un espectrofotómetro de flama (Na y K). El calcio y el magnesio solubles son medidos por espectrofotometría de absorción atómica y el potasio y el sodio por espectrofotometría de emisión atómica en los extractos diluidos. Las interferencias en las mediciones son eliminadas con lantano (La) y cesio (Cs) respectivamente

Reactivos

Los reactivos que a continuación se mencionan deben ser grado analítico cuando se hable de agua se debe entender agua desionizada o destilada. Las soluciones para este análisis deben almacenarse en recipientes de polietileno.

1. Solución de lantano acidificada. Pesar 7.742 g de $\text{La}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$ en un matraz volumétrico de 250 mL, añadir algo de agua y 17.5 mL de HNO_3 concentrado, aforar con agua.
2. Solución estándar de 1000 mg L⁻¹ de Ca. Pesar 2.497 g de CaCO_3 en un vaso de precipitado de 250 mL, añadir aproximadamente 100 mL de agua, y 12.5 ml de HCl 4M hervir para eliminar el CO_2 (si permanecen partículas de CaCO_3 añadir 2 mL más de HCl 4M). Enfriar y transferir la solución a un matraz volumétrico de un litro y aforar con agua.
3. Solución estándar de 100 mg L⁻¹ de Mg. Pesar 1.013 g de $\text{MgSO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$ en un matraz volumétrico de un litro y aforar con agua.
4. Solución estándar mezclada, 100 mg L⁻¹ de Ca y 10 mg L⁻¹ de Mg tomar 10 ml de la solución estándar de 1000 mg L⁻¹ de Ca y 10 ml de la solución estándar de 100 mg L⁻¹ de Mg en un matraz volumétrico de 100 ml y aforar con agua.
5. Solución diluida de lantano acidificada. Tomar 50 mL de la solución de lantano acidificada en un matraz volumétrico de 500 mL y aforar con agua.
6. Solución de cloruro de cesio acidificada. Disolver 11.12 g de CsCl y 250 g de $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ en aproximadamente 500 mL de agua en un matraz volumétrico de 1000 ml, añadir 20 mL de HNO_3 2 M y aforar con agua.
7. Solución estándar de 1000 mg L⁻¹ de K y 400 mg L⁻¹ de Na. Disolver 1.9065 g de KCl y 1.0168 g NaCl en agua en un matraz volumétrico de 1000 mL y aforar con agua.
8. Solución estándar diluida de 100 mg L⁻¹ de K y 40 mg L⁻¹ de Na. Pipetear 25 mL de la solución estándar en un matraz volumétrico de 250 mL, aforar con agua.

Material y equipo

1. Material común de laboratorio.
2. Espectrofotómetro de absorción atómica.
3. Espectrofotómetro de emisión atómica (flamómetro).

Determinación de Ca y Mg

1. Series estándar. Pipetear 0, 2.0, 3.0, 4.0 y 5.0 mL, respectivamente, de la solución estándar mezclada en seis matraces volumétricos de 100 mL y agregar 5.0 mL de tiourea 0.1 M y 9.5 mL de la solución diluida de lantano y aforar con agua. La concentración de las series estándar es de: 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 y 0.5 mg L⁻¹ de Mg y 0, 1, 2, 3, 4 y 5 mg L⁻¹ de Ca.
2. Pipetear 2 mL del extracto de saturación en un tubo de ensaye, añadir 2 mL de la solución de lantano y homogeneizar.
3. Medir el Ca y Mg en el aparato de absorción atómica a una longitud de onda de 422.7 y 285.2 nm, respectivamente.

CÁLCULOS

$$\text{Ca soluble mmol L}^{-1} = \frac{(a - b) \times d}{P E}$$

$$\text{Mg soluble mmol L}^{-1} = \frac{(a - b) \times d}{P E}$$

Donde:

a = mg L⁻¹ de Ca o Mg en el extracto diluido

b = mg L⁻¹ en el blanco

d = Factor de dilución

PE = Peso equivalente (Ca = 20 y Mg = 12.15).

Determinación de Na y K

1. Serie estándar de Na y K. Pipetear 0, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0 y 5.0 mL de la solución estándar diluida en seis matraces volumétricos de 100 mL, respectivamente, añadir un poco de agua, 10 mL de tiourea 0.1 M y 9 mL de la solución de CsCl aforar con agua y mezclar. Esta serie estándar tiene concentraciones de: 0, 1, 2, 3, 4 y 5 mg L⁻¹ de K y 0, 0.4, 0.8, 1.2, 1.6 y 2 mg L⁻¹ de Na.

2. Pipetear 2 mL del extracto de saturación en un tubo de ensaye, añadir 2 mL de la solución de Cs y homogeneizar.
3. Medir Na y K en el espectrofotómetro de emisión atómica a una longitud de onda de 589 y 766.5 nm, respectivamente.

CÁLCULOS

$$\text{Na soluble m mol L}^{-1} = \frac{(a - b) \times d}{PE}$$

$$\text{K soluble m mol L}^{-1} = \frac{(a - b) \times d}{PE}$$

Donde:

a = mg L⁻¹ de Na o K en el extracto diluido

b = mg L⁻¹ en el blanco

d = Factor de dilución

PE = Peso equivalente (Na = 23.0 y K = 39.1).

ANEXO 2. FRAGMENTO DE LA NMX-AA-028-SCFI-2001

ANÁLISIS DE AGUA - DETERMINACIÓN DE LA DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO EN AGUAS NATURALES, RESIDUALES (DBO5) Y RESIDUALES TRATADAS - MÉTODO DE PRUEBA (CANCELA A LA NMX-AA-028-1981)

OBJETIVO Y CAMPO DE APLICACIÓN

Esta norma mexicana establece el método de análisis para la determinación de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO5) en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.

NOTA. Se determina la cantidad de oxígeno utilizada por una población microbiana heterogénea para transformar la materia orgánica, en un periodo de incubación de 5 días a 20°C.

PRINCIPIO DEL MÉTODO

El método se basa en medir la cantidad de oxígeno que requieren los microorganismos para efectuar la oxidación de la materia orgánica presente en aguas naturales y residuales y se determina por la diferencia entre el oxígeno disuelto inicial y el oxígeno disuelto al cabo de cinco días de incubación a 20°C.

ANEXO 3. FRAGMENTO DE LA NMX-AA-030-SCFI-2001

ANÁLISIS DE AGUA - DETERMINACIÓN DE LA DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO EN AGUAS NATURALES, RESIDUALES Y RESIDUALES TRATADAS - MÉTODO DE PRUEBA (CANCELA A LA NMX-AA-030-1981)

OBJETIVO Y CAMPO DE APLICACIÓN

Esta norma mexicana especifica dos métodos para la determinación de la demanda química de oxígeno en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.

PRINCIPIO DEL MÉTODO

Una gran cantidad de compuestos orgánicos e inorgánicos son oxidados con una mezcla de ácido crómico y sulfúrico a ebullición. La muestra se coloca a reflujo en una disolución de ácido fuerte con un exceso conocido de dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$). Después de la digestión, el dicromato no reducido se mide por titulación o espectrofotométricamente para determinar la cantidad de dicromato consumido y calcular la materia oxidable en términos de oxígeno equivalente.

**ANEXO 4. ELABORACIÓN DEL FILTRO DE ARENA Y GRAVA,
FRAGMENTO DEL DOCUMENTO “MANUAL DE BUENAS PRACTICAS”
EDITADO POR LA FUNDACIÓN CARLOS SLIM**

Materiales y herramientas para hacer un filtro vertical.

Materiales	Herramientas
Un bote o tambo de plástico con tapa, reciclado, de 56 cm de diámetro de la boca y 62 cm de altura aproximadamente.	Segueta
Una canastilla de 58 cm de diámetro por 21 cm de altura.	Flexómetro (metro)
Una canastilla de 47 cm de diámetro por 25 cm de altura.	Taladro
Grava suficiente para rellenar una canastilla.	Sacabocados de 1 ½ pg y de 2pg
Media canastilla de tezontle del tamaño de la grava.	1 pistola con tubo de silicón.
¼ de canastilla de tepojal o tezontle tamaño gravilla (ni tan grande como la grava ni tan fino como la arena)	
1 brida de 1 ½ pg (macho y hembra).	
1 conector macho de 1 ½ pg.	
Saquito de malla plástica fina, como la bolsa del mandado o la malla mosquitero, de 17 por 21 cm.	
Hilo de pescar (u otro de plástico) y aguja de canevá.	
1 conector macho de 2 pg.	
½ kilo de carbón activado	
1 conector hembra de 2 pg.	
½ kilo de arena.	
Un metro de tubo sanitario de 1 ½ pg.	
Un metro cuadrado de malla mosquitero de plástico.	
Dos metros de alambre quemado	

Procedimiento para la construcción del filtro

1	Con la ayuda de un taladro saca bocados de 1 ½ pulgadas, hacer un agujero en el centro de la tapa.
2	Colocar la brida macho de 1 ½ pg por debajo del agujero de la tapa, procurar que llegue al tope, posteriormente enroscar la brida hembra de 1 ½ pg y colocar un conector macho de 1 ½ con cuerda externa, sellar con la pistola de silicón a fin de evitar fugas.
3	Hacer un agujero de 2 pg, con ayuda del taladro saca bocados, 5 cm arriba de la base del bote. Allí vamos a conectar después el tubo de salida del filtro.
4	Colocar en el conector macho de de 2 pg un empaque de goma de la misma medida, posteriormente colocar ambas piezas por dentro del recipiente y por fuera enroscar el conector hembra de 2 pg, sellar con el silicón a fin de evitar fugas.
5	Hacer dos agujeros en el borde de cada canastilla, uno frente al otro, y colocar un asa de alambre o lazo de plástico a cada canastilla, agarrándolo de los agujeros.

6	Cortar el tubo sanitario de 1 ½ pg en 10 partes de 10 cm de altura cada uno y colocarlos paraditos hasta abajo del filtro. Sobre los tramos de tubo colocar la primera canastilla (la más alta y de menos diámetro) y llenar de grava.
7	Sobre los tramos de tubo colocamos la primera canastilla (la más alta y de menos diámetro) y la llenamos de grava. Nuestra canastilla debe hacer contacto con los tramos de tubo que colocamos hasta abajo del bote.
8	Introducir la segunda canastilla y llenar hasta la mitad con tezontle tamaño grava. Añadir ¼ de tezontle tamaño gravilla, y hasta arriba, el costalito de malla de plástico, relleno de ½ kg de arena y ½ kg de carbón activado.
9	Si hay huecos entre la canastilla y el bote, y rellenarlos con piedra de tezontle.
10	Se cubre toda la parte superior de la canastilla con una malla mosquitero, haciendo que suba un poco por la pared del filtro.
11	Una vez terminado de hacer el filtro, conectar el tubo de alimentación en la parte superior de la tapa del filtro; es decir el tubo que proviene del lavadero, tarja, lavadora u otras fuentes de aguas grises.
12	Conectar el tubo de la salida del filtro y dirigir hacia el jardín, plantas, árboles o algún recipiente en dónde se pueda captar el agua tratada y reutilizarla. Al principio, el agua saldrá turbia porque el material filtrante se está lavando.



Filtro vertical

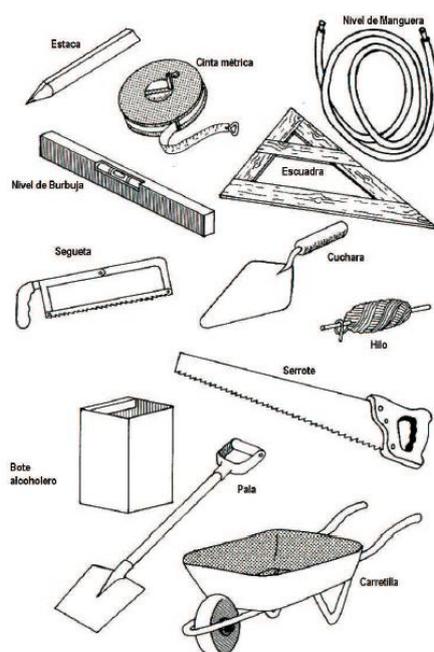
Corte del filtro vertical con sus materiales filtrantes.

ANEXO 5. CONSTRUCCIÓN DE INVERNADEROS RÚSTICOS SAGARPA

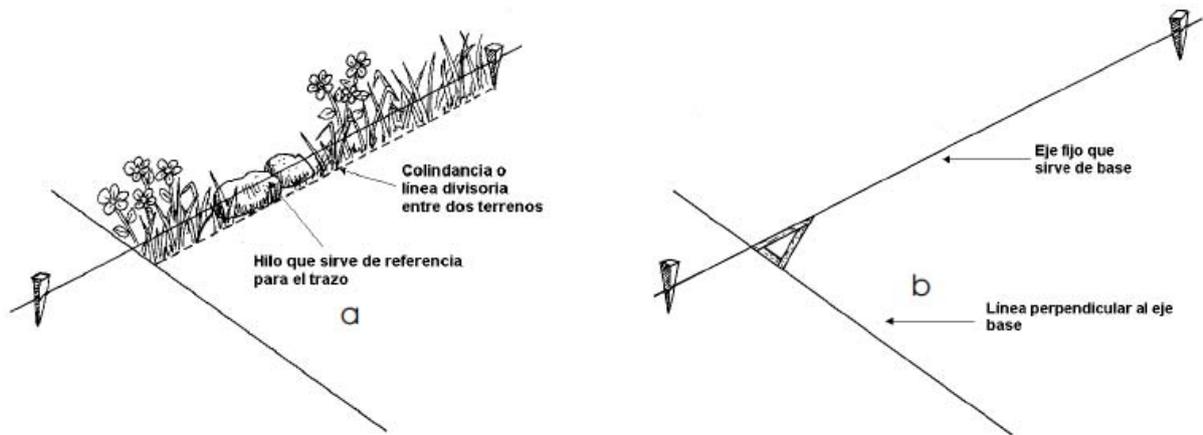
Materiales para la construcción

MADERA		
DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL	UNIDAD	CANTIDAD
Polín de madera de 0.05 x 0.10 x 2.40 m	Pieza	25
Polín de madera de 0.05 x 0.10 x 4.75 m	Pieza	22
Polín de madera de 0.05 x 0.10 x 3.2m	Pieza	11
Polín de madera de 0.05 x 0.10 x 3.0m	Pieza	4
Cinta de madera de 0.025 x 0.05 x 2.44 m	Pieza	110
Cinta de madera de 0.025 x 0.05	Pieza	18
Cinta de madera de 0.015 x 0.025 x 44	Pieza	100
Clavos de 2.0"	Kg	1
Clavos de 1.5	Kg	1
Esquineros de 1" x 2"	Pieza	60
Malla mosquitera plástica de 1.6m x 70 m	m	70
Tachuelas de ½"	Kg	1
Polietileno transparente tratado contra rayos ultravioleta (PF-603)	Kg	70
Arena	m ³	0.1
Grava	m ³	0.2
Cemento	Bulto	2
Tornillos de ¼" x 4.5" (Cuerda y Tuerca)	Pieza	50

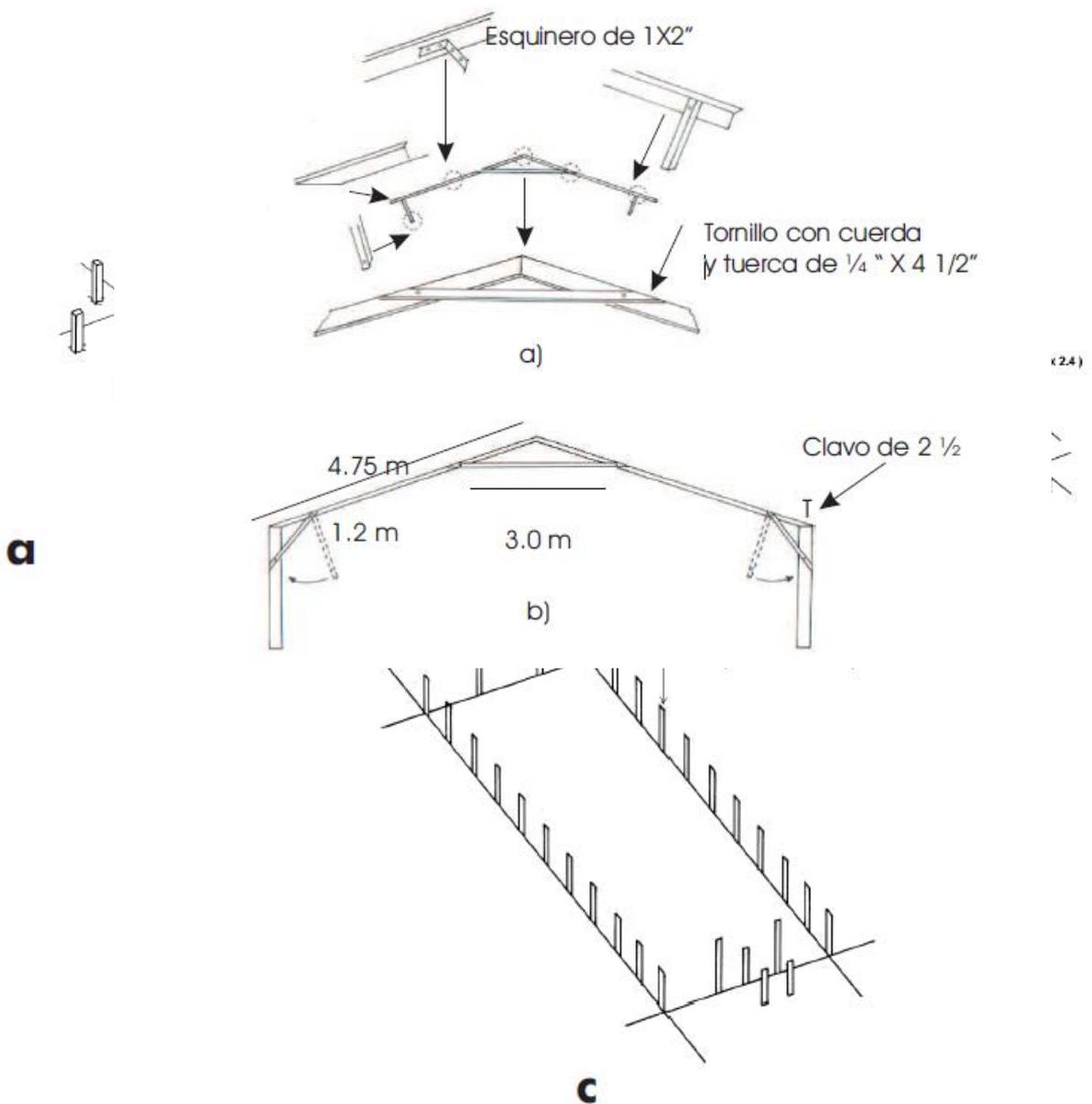
Herramienta requerida para la construcción



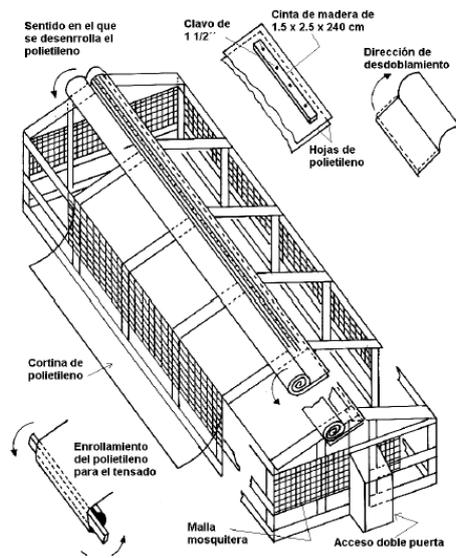
Tendido de hilo y trazo de perpendiculares



Construcción de la armadura tipo 2 aguas, Construcción de la armadura sobre los polines



(24)



Colocación de la malla mosquitera y el polietileno como cobertura

