



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

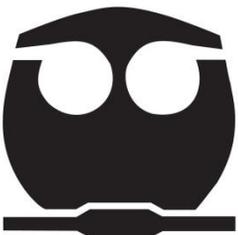
**HUMEDALES ARTIFICIALES Y SU CONTRIBUCIÓN AL
AUMENTO EN LA CAPACIDAD DE CARGA EN LA ZONA
LACUSTRE DE XOCHIMILCO, D. F.**

TESINA QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERA QUÍMICA

PRESENTA

MARIANA FLORES FLORES



MÉXICO, D.F. 2012

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: Profesor: Rodolfo Torres Barrera

VOCAL: Profesor: Víctor Manuel Luna Pabello

SECRETARIO: Profesor: Maria Rafaela Gutiérrez Lara

1er SUPLENTE: Profesor: Néstor Noé López Castillo

2° SUPLENTE: Profesor: Alfonso Durán Moreno

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

El presente trabajo, fue elaborado en el Laboratorio de Microbiología Experimental del Departamento de Biología de la Facultad de Química de la UNAM.

ASESOR DEL TEMA:

SUSTENTANTE:

**DR. VÍCTOR MANUEL LUNA
PABELLO**

MARIANA FLORES FLORES

Reconocimientos

Se hace patente el apoyo recibido por parte del proyecto PAPIIT - IT103312-3 y PAIP 6190-14 (VMLP 2011-2012).

Agradecimientos

El presente trabajo significa para mí la culminación de 20 años de asistir a clases, elaborar tareas, trabajos, exposiciones, estudiar para aprobar exámenes, entre otras gracias que hacemos los estudiantes.

En estas dos décadas he corroborado la teoría de mi madre: poner atención a mis deberes es la mejor estrategia para cumplir mis metas, no importa que tan inteligente seas, lo importante es ser constante y es por eso, que hoy, después de cuatro lustros puedo concluir con este proyecto.

Estos años han puesto en mi camino a muchas personas, todas ellas me han aportado parte de lo que soy ahora, algunas han desaparecido en el camino, otras permanecen hasta hoy. Lo cierto es que gracias a todos ellos he podido terminar lo que empecé hace veinte años.

Quiero en estas líneas agradecer especialmente a las personas que a pesar de los malos momentos que en algunas ocasiones aporto, permanecen a mi lado, caminando conmigo, presionándome para seguir "poniendo atención":

A mi familia, mi madre, Azucena Flores, que es el ejemplo perfecto de las personas que a pesar de los malos momentos permanece conmigo; gracias por no dejarte abatir, por aguantarme, por consentirme, por educarme, por quererme a pesar de todo, por ser tu. Muchas muchas gracias.

Mi tía Chela, que se ha empeñado en siempre consentirme y quererme, ser un gran apoyo, un cómplice.

A mi abuela Chagua, nos faltó vida para que vieras el fruto de tu esfuerzo, aun así, sé que estás ahí.

A mis amigos, los del Colegio, se han convertido en mis hermanos, caminado juntos la mayor parte de este sendero.

Gracias a todos los universitarios que se cruzaron en mi camino, algunos ya desaparecieron, otros se fueron pero afortunadamente regresaron a mi camino, universitarios de Facultad de Química, Facultad de Ingeniería, UNIVERSUM, Facultad de Filosofía, Facultad de Ciencias.

Dr. Luna Pabello, muchas gracias por el tiempo dedicado a mí, y todas las orientaciones que tuvo que brindarme.

Específicamente para este trabajo, gracias al Laboratorio de Microbiología Experimental, todos ustedes fueron fundamentales para poder concretar este proyecto; Héctor, Sergio, Benja, Hugo, Tenoch. Muchas gracias por el tiempo brindado muchachos.

Gracias a mis compañeros de CONAGUA por presionarme y brindarme todas las facilidades para terminar con esto.

Y finalmente, Andrés, gracias por darme el último empujón para regresar a la Facultad de Química, por acompañarme y esmerarte por nunca dejarme caer.

Cierto día una liebre se burlaba de las cortas patas y lentitud al caminar de una tortuga.

Pero ésta, riéndose, le replicó:

-Puede que seas veloz como el viento, pero yo te ganaría en una competencia.

Y la liebre, totalmente segura de que aquello era imposible, aceptó el reto, y propusieron a la zorra que señalara el camino y la meta.

Llegando el día de la carrera, arrancaron ambas al mismo tiempo. La tortuga nunca dejó de caminar y a su lento paso pero constante, avanzaba tranquila hacia la meta. En cambio, la liebre, que a ratos se echaba a descansar en el camino, se quedó dormida. Cuando despertó, y moviéndose lo más veloz que pudo, vio como la tortuga había llegado de primera al final y obtenido la victoria.

Moraleja: Con seguridad, constancia y paciencia, aunque a veces parezcamos lentos, obtendremos siempre el éxito.

La Liebre y la Tortuga

Esopo

Contenido

Reconocimientos	i
Agradecimientos.....	ii
Glosario	xi
Resumen	xv
1. Introducción.....	1
2. Objetivos	8
3. Marco teórico	9
3.1 Humedal artificial de flujo combinado (HAFC) ubicado en el Centro de Investigaciones Biológicas y Acuícolas de Cuemanco (CIBAC)	10
3.2 Desarrollo de trabajos experimentales a partir del HAFC	16
3.3 Ejercicios de modelación a partir del HAFC	22
3.4 Indicadores de impacto ambiental	28
3.5 Huella ecológica	30
3.6 Perspectivas para el HAFC	36
3.7 Unidades de manejo para la conservación de vida silvestre (UMA) 50	
4. Metodología	58
4.1 Espacio acuático.....	60
4.2 Superficie forestal	60
4.3 Campos de cultivo	61
4.4 Área de absorción.....	62
5. Resultados y discusión.....	63

6. Conclusiones	73
Bibliografía	74
Apéndice A	I
Apéndice B	V

Figura 1. Reúso del agua residual en México, 2009. (Comisión Nacional del Agua, 2011)	3
Figura 2. Diagrama de proceso del HAFC. (Sánchez García, 2009)	12
Figura 3. Sistema 1, con sólo un tipo de material de empaque (González González, 2011)	18
Figura 4. Sistema 2, con tres tipos de material de empaque (González González, 2011)	18
Figura 5. Sistema 3, de flujo vertical y con tres tipos de material de empaque (González González, 2011)	18
Figura 6. Estanques para la reproducción de ajolotes con agua del humedal artificial construido en una chinampa (González González, 2011)	21
Figura 7. Construcción de un humedal artificial para fines acuícolas (González González, 2011)	21
Figura 8. Otro diseño de humedal artificial en la zona chinampera de Xochimilco (González González, 2011)	21
Figura 9. Sistema experimental (Aburto Castañeda, 2011)	23
Figura 10. Propuesta de algoritmo para generar modelos matemáticos que simulan el flujo del nitrógeno en HAFSS (Rosado Lozano, 2010) ...	28
Figura 11. Esquema del balance de materia del HAFC construido en CIBAC	29
Figura 12. Huella ecológica de un habitante de la delegación Xochimilco	34
Figura 13. Capacidad de carga de la delegación Xochimilco	35
Figura 14. Ubicación de las tres localidades de estudio de la Zona lacustre de Xochimilco (Luna Pabello & Aburto Castañeda, 2010)	40
Figura 15. Superficie de la primera localidad (Luna Pabello & Aburto Castañeda, 2010)	41

Figura 16. Diseño conceptual del sistema de barreras filtrantes en la primera localidad de Xochimilco (Luna Pabello & Aburto Castañeda, 2010)	42
Figura 17. Diseño conceptual de un sistema de HA para la primera localidad visitada en Xochimilco (Luna Pabello & Aburto Castañeda, 2010)	43
Figura 18. Imágenes de la chinampa de la segunda localidad (Luna Pabello & Aburto Castañeda, 2010).....	44
Figura 19. Diseño conceptual del sistema de barreras filtrantes en la segunda localidad (Luna Pabello & Aburto Castañeda, 2010).....	45
Figura 20. Azolvamiento de canales y estanques en la tercera localidad (Luna Pabello & Aburto Castañeda, 2010).....	46
Figura 21. Esquema conceptual del sistema de depuración recomendado para la tercera localidad. (Luna Pabello & Aburto Castañeda, 2010)	47
Figura22. Superficie y número de UMA registradas, 1995-2008. (SEMARNAT, Informe de la Situación del Medio Ambiente en México, 2008)	53
Figura23. Unidades de Manejo para la conservación de la vida silvestre UMA, en 2008 (SEMARNAT, Informe de la Situación del Medio Ambiente en México, 2008).....	55
Figura24. Diagrama de flujo del tren de tratamiento para la primera localidad. (Luna Pabello & Aburto Castañeda, 2010)	64
Figura25. Diagrama de flujo del tren de tratamiento para la segunda localidad (Luna Pabello & Aburto Castañeda, 2010).	67
Figura26. Diagrama de flujo del tren de tratamiento para la tercera localidad del (Luna Pabello & Aburto Castañeda, 2010).	70

Tabla 1. Volumen de material de soporte y tamaño de partículas del sistema de HAFC (Sánchez García, 2009)	14
Tabla 2. Concentración de sólidos a la salida del lecho del HAFC.....	15
Tabla 3. Concentración de nitrógeno y fósforo total a la salida del lecho y del filtro de pulimento (FP) del HAFC.(Ramirez Carrillo, Luna Pabello, Arredondo Figueroa, & Gallegos Martinez, 2009)	16
Tabla 4. Porcentaje promedio de remoción de contaminantes por cada sistema (González González, 2011)	19
Tabla 5. Parámetros a evaluar en los sistemas experimentales. Modificado de (Aburto Castañeda, 2011)	24
Tabla 6. Mecanismos de transformación de nitrógeno utilizados en las investigaciones (Rosado Lozano, 2010)	27
Tabla 7. Impactos ambientales de los insumos, productos y subproductos del HAFC	30
Tabla 8. Consumo de la población en diferentes categorías, para el cálculo de la Huella Ecológica	32
Tabla 9. Consumo de la población de la Delegación Xochimilco, en diferentes categorías, para el cálculo de la Huella Ecológica*	32
Tabla 10. Terreno productivo calculado, para los consumos de la población.....	33
Tabla 11. Terrenos productivos reportados de la delegación Xochimilco (INEGI, 2011)	35
Tabla 12. Comparación de los terrenos productivos necesarios y existentes.....	37
Tabla 13. Comparación de costos por m ³ de agua tratada por proceso de tratamiento.	49
Tabla 14. Comparación de la Huella Ecológica con la Capacidad de Carga de la Región, en km ² /año	58
Tabla 15. Terreno productivo que se ve afectado con la construcción del humedal artificial diseñado para la primera localidad.....	66

Tabla 16. Terreno productivo que se ve afectado con la construcción del humedal artificial diseñado para la segunda localidad..... 68

Tabla 17. Terreno productivo que se ve afectado con la construcción del humedal artificial diseñado para la tercera localidad..... 72

Glosario

Agricultura ecológica. Son formas de producción agropecuaria que se desarrollan en concordancia con los sistemas biológicos y llevan a cabo su función en el espacio vital, basados en la conservación y el mejoramiento de la fertilidad del suelo, la protección de biodiversidad y en la minimización de impactos ambientales, y son socialmente responsables. No utilizan como insumos: agroquímicos sintéticos, plaguicidas, organismos genéticamente modificados. (NADF-002-RNAT-2002 Norma ambiental para el Distrito Federal que establece las condiciones para la agricultura ecológica en el suelo de conservación del Distrito Federal, 2003)

Ajolote *Ambystoma mexicanum*. Es una especie endémica de los Estados Unidos Mexicanos, catalogada como especie en peligro de extinción, es decir que sus áreas de distribución o tamaño de sus poblaciones en el Territorio Nacional han disminuido drásticamente poniendo en riesgo su viabilidad biológica en todo su hábitat natural, debido a factores tales como la destrucción o modificación drástica del hábitat, aprovechamiento no sustentable, enfermedades o depredación, entre otros. Fue catalogada como especie en peligro de extinción, por el Método de evaluación del riesgo de extinción de las especies silvestres en México (MER), que unifica los criterios de decisión sobre las categorías de riesgo y permite usar información específica que fundamente esa decisión. (NOM-059-SEMARNAT-2010 Protección ambiental - Especies nativas de México de flora y fauna silvestres - Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio - Lista de especies en riesgo, 2010)

Capacidad de carga ecológica. Es la capacidad que tiene una región para producir sus propios recursos.

Centro de Investigaciones Biológicas y Acuícolas de Cuernavaca (CIBAC). Es un proyecto que depende de la rectoría de la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Xochimilco (UAM-X), que se dedica a estudiar y difundir los problemas que tiene la Zona Lacustre de Xochimilco; ha hecho investigaciones de flora y fauna endémica, estudios sobre contaminación y rehabilitación del hábitat, el aprovechamiento de los recursos naturales, difundiendo conocimientos y técnicas acuícolas y agrícolas, así como servicios ambientales en beneficio de los pobladores. A través de programas de investigación y docencia, fomenta proyectos de educación ambiental y preservación de tradiciones desde niños de preescolar hasta jóvenes de nivel medio superior. (CIBAC, 2011)

Ecotecnología. Tecnología que se basa en los principios de los sistemas naturales, y que se acercan a lo que ocurre en la naturaleza, al imitarla. (Rodríguez Monroy & Durán de Bazúa, 2006)

Especies endémicas. Son aquellas cuyo ámbito de distribución natural se encuentra circunscrito únicamente al Territorio Nacional y a las zonas donde la Nación ejerce su soberanía y jurisdicción. (NOM-059-SEMARNAT-2010 Protección ambiental - Especies nativas de México de flora y fauna silvestres - Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio - Lista de especies en riesgo, 2010)

Huella ecológica. El área de territorio ecológicamente productivo (cultivos, pastos, bosques o ecosistema acuático) necesario para producir los recursos utilizados y para asimilar los residuos producidos por una población definida con un nivel de vida específico indefinidamente, donde sea que se encuentre esta área, fue definida en

1996 por William Rees y Mathis Wackernagen en la Escuela para la planificación comunitaria y regional de la Universidad de la Columbia Británica. (García, y otros, 2005)

Humedal Artificial de Flujo Combinado (HAFC). Sistema intermitente acoplado a un filtro de pulimento, en la zona lacustre de Xochimilco, Ciudad de México. Tiene una superficie total de 55m² y opera con flujo de 3 a 6 m³/d. Posee la característica de poder operar tanto en forma vertical, como horizontal. (Luna Pabello & Ramírez Carrillo, 2009)

Indicadores ambientales. Es un factor ambiental que transmite información sobre el estado del ecosistema del que forma parte o de alguna característica del mismo. (Garmendia, Salvador, Crespo , & Garmendia , 2006)

Indicadores de impacto ambiental. Son indicadores ambientales que se utilizan para determinar la calidad ambiental o su cambio, asociado a una determinada acción; mide el efecto de los impactos en los ecosistemas. (Garmendia, Salvador, Crespo , & Garmendia , 2006)

NADF-002-RNAT-2002. Es una norma ambiental para el Distrito Federal, que establece las condiciones para la agricultura ecológica en el suelo de conservación del Distrito Federal.

NOM-001-SEMARNAT-1996. Es la norma oficial mexicana, de carácter obligatorio, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en agua y bienes nacionales.

Riego agrícola restringido. Es el uso del agua residual destinada a la actividad de siembra, cultivo y cosecha de productos agrícolas, excepto legumbres y verduras que se consumen crudas. (NOM-001-SEMARNAT-

1996. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales., 1997)

Sello verde. Es un certificado que garantiza a las y los consumidores que los productos en fresco y/o procesados que lo ostentan, son orgánicos, cultivados mediante agricultura ecológica, y producidos en el suelo de conservación del Distrito Federal. (Secretaría del medio ambiente del Distrito Federal)

Suelo de conservación. Aquel que lo amerite por su ubicación, extensión, vulnerabilidad y calidad; el que sea vulnerable a impacto en el medio ambiente y sea reconocido en el ordenamiento territorial; los promontorios, los cerros, las zonas de recarga del acuífero, las colinas, elevaciones y depresiones orográficas que constituyan elementos naturales del territorio de la ciudad y aquel cuyo subsuelo se haya visto afectado por fenómenos naturales, por explotaciones o aprovechamientos de cualquier género, que representen peligros permanentes o accidentales para el establecimiento de los asentamientos humanos. Así mismo, comprende el suelo destinado a la producción agropecuaria, piscícola, forestal, agroindustrial y turística así como los poblados rurales. (NADF-002-RNAT-2002 Norma ambiental para el Distrito Federal que establece las condiciones para la agricultura ecológica en el suelo de conservación del Distrito Federal, 2003)

Unidades de Manejo para la Conservación de Vida Silvestre (UMA). Son los predios e instalaciones registrados que operan de conformidad con un plan de manejo aprobado y dentro de los cuales se da seguimiento permanente al estado del hábitat y de poblaciones o ejemplares que ahí se distribuyen. (Ley General de Vida Silvestre, 2010)

Resumen

Los humedales artificiales contribuyen en el aumento de la capacidad de carga ecológica en los sistemas ambientales, por lo que su implementación en la zona lacustre de Xochimilco, D.F. es de gran viabilidad.

Para establecer la magnitud de dicha contribución, es necesario contar con información específica de su capacidad depuradora y generación de subproductos. En este contexto, se realizaron estudios en un humedal artificial de flujo combinado (HAFC), construido bajo el marco del convenio UNAM-UAM: "Estudios integrales e interdisciplinarios relacionados con la sustentabilidad, la conservación ecológica y la biodiversidad de la zona lacustre de Xochimilco" en las instalaciones del Centro de Investigaciones Biológicas y Acuícolas de Cuemanco (CIBAC). Inició su proceso de operación en el mes de mayo de 2007, fue construido para dar una respuesta a la problemática del tratamiento de agua del canal de Cuemanco que recibe descargas de aguas negras, lo que propicia un proceso de deterioro en la zona. Este sistema fue diseñado para que el agua tratada con este sistema cumpla con los límites máximos permisibles de la NOM-001-SEMARNAT-1996 y pueda ser utilizada para riego agrícola restringido.

La búsqueda de una mayor eficiencia del HAFC ha sido el inicio de varios trabajos experimentales en los que se han combinado los diferentes factores que intervienen en el tratamiento de agua por este tipo de sistemas, que son: tipo de plantas, medio de soporte, variedad de microorganismos y características hidráulicas. Los trabajos experimentales han dado como resultado un mejor entendimiento de los procesos de remoción que se llevan a cabo en un humedal artificial y el

desarrollo de modelos que permitan describir la acción depuradora de éste. Su acción depuradora, permite que este sistema brinde beneficios a la comunidad que utiliza su producto terminal, este tratamiento al agua del canal de Cuemanco evita utilizar agua potable para el riego y para los acuarios de investigación donde se cultiva el ajolote, este uso de agua tratada se traduce en ahorro de agua potable, de energía eléctrica, de construcción de ductos que lleven el agua, entre otros. Para hacer esta evaluación del HAFC es necesario conocer cuánto limpia y cuánto le ahorra a la comunidad el tratamiento del agua del canal de Cuemanco, que se traduce en la cantidad de contaminantes que remueve y una comparación entre los costos de instalación, operación y mantenimiento del sistema y el uso de agua potable y energía en las actividades de agricultura y cultivo de ajolotes que se llevan a cabo en CIBAC.

A la fecha los resultados del análisis de este sistema en la zona lacustre de Xochimilco D.F., permiten afirmar que la construcción del HAFC ha tenido un impacto positivo, en la comunidad ya que ha sido tomado de referencia para ser replicado por parte de los habitantes de comunidades adyacentes, lo que representa una aceptación de este tipo de tecnologías ya que implica la inversión de tiempo, dinero y esfuerzo por parte de las personas que los han construido. Lo anterior, permite vislumbrar de manera más precisa que la magnitud de su contribución en el aumento de la capacidad de carga en zona lacustre de Xochimilco, aumentará gradualmente.

1. Introducción

La Secretaría de Medio Ambiente del Distrito Federal, identifica a la delegación Xochimilco como una de las nueve delegaciones que cuenta con una zona denominada 'suelo de conservación', que constituye el patrimonio natural del cual depende la sobrevivencia y bienestar de las generaciones futuras del Distrito Federal, ya que esta zona proporciona bienes y servicios ambientales que permiten la viabilidad de la Ciudad, entre los que se encuentran: la captación e infiltración de agua al manto acuífero, regulación del clima, mejoramiento de la calidad del aire, hábitat para la biodiversidad, oportunidades para la educación, investigación y recreación, producción de alimentos y materias primas, entre otros. (Comisión de recursos naturales de la Secretaría de medio ambiente, 2010).

A pesar de que Xochimilco ahora es considerado 'suelo de conservación', en la zona lacustre de esta delegación se tienen descargas clandestinas de aguas residuales domésticas, descargas de algunas industrias y los canales de esta zona del Distrito Federal se llenan con agua residual tratada proveniente del Cerro de la Estrella, Iztapalapa. (Comisión Nacional del Agua, 2009)

Además del deterioro visual que ha tenido esta zona del Distrito Federal, las descargas de aguas residuales en el canal, traen consigo riesgos colaterales en la salud humana, ya que el agua del canal de Cuemanco es frecuentemente utilizada para el riego agrícola. Actualmente, la mayoría de los cultivos que normalmente se realizan en este suelo, son de hortalizas (35%), plantas ornamentales (32.5%), maíz (27.5%) y forraje el 5%. (Stephan - Otto, 2006).

Por las cifras mencionadas, es evidente que los cultivos para consumo humano y animal son la mayoría, lo que obligaría a los agricultores a estar completamente seguros de que el agua con la que riegan sus productos sea agua totalmente segura, y para ello el gobierno del Distrito Federal, por medio de la Secretaría de Medio Ambiente, creó un proyecto llamado "Sello Verde", que además de dar asesoría a los agricultores para ejercer su actividad de manera orgánica, da apoyos económicos para obtener el certificado correspondiente, la normatividad de este proyecto, se puede encontrar en la norma ambiental NADF-002-RNAT-2002, que establece las condiciones para la agricultura ecológica en el suelo de conservación del Distrito Federal (Romero Azuela, 2006).

Según la citada norma, la práctica de la agricultura ecológica debe conservar y recuperar los suelos, manejar de manera ecológica plagas y enfermedades, conservar la biodiversidad y la diversidad fitogénica, así como conservar los sistemas agroforestales. Se debe utilizar como fertilizantes, compostas, lombricompostas y abonos verdes; y tener prácticas de riego con aguas residuales según las disposiciones de la NOM-001-SEMARNAT-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales; es incompatible a la agricultura ecológica el uso de lodos de alcantarilla.

Según datos de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), el tratamiento de aguas residuales en México, ha tenido un avance considerable, en 1996 se trataban $33.7\text{m}^3/\text{s}$ de agua residual municipal colectada y en el 2009, se tuvo un tratamiento de $88.1\text{m}^3/\text{s}$, el 42% del total de agua residual municipal que se colecta en el País; en 2008, la CONAGUA estimó que $160\text{m}^3/\text{s}$ del agua tratada de origen municipal, fue reutilizada en cultivos agrícolas, en la Figura 1, se muestra un

esquema del reúso de agua residual en el País. (Comisión Nacional del Agua, 2011)

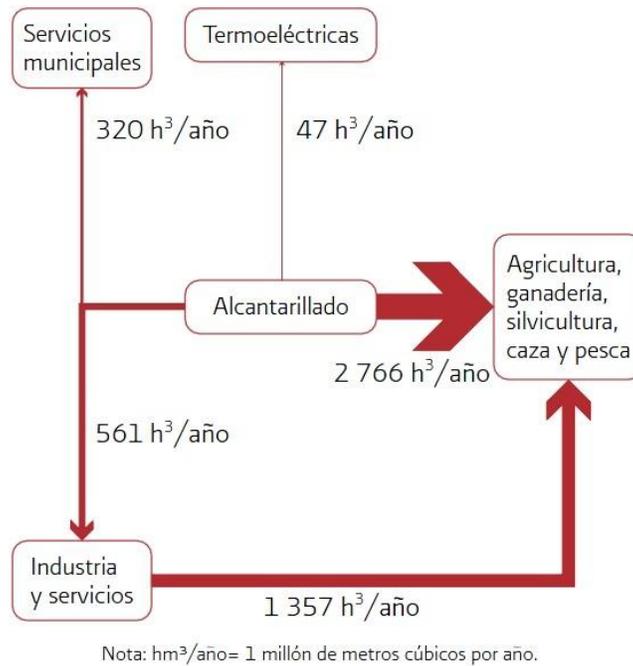


Figura 1. Reúso del agua residual en México, 2009. (Comisión Nacional del Agua, 2011)

Para cumplir con el requerimiento de riego, es necesario dar un tratamiento al agua proveniente de los canales de la zona lacustre de la delegación Xochimilco, ya que a pesar de ser agua residual tratada, ocurren descargas que pueden afectar los parámetros de los límites máximos permisibles marcados en la citada norma oficial mexicana.

Para realizar este tratamiento, se pueden utilizar diversos procesos: ósmosis inversa, filtración directa, clarificación convencional, adsorción o filtración lenta, sin embargo algunos de ellos tienen un alto costo de construcción y operación, además que Xochimilco es una zona de conservación por lo que el acceso de ciertos materiales es restringido, como lo estipula el Reglamento de Construcción del Distrito Federal en su artículo 58, fracción I. Debido a estas restricciones se ha encontrado

una solución factible para este problema de tratamiento, la construcción y operación de humedales artificiales.

Los humedales artificiales, son sistemas de depuración biológica capaces de transformar los contaminantes contenidos en cuerpos de agua, removiéndolos del medio para mejorar la calidad del agua que es tratada en estos, su diseño y operación se basa en los principios de los sistemas naturales, al imitarlos, son denominados genéricamente como ecotecnologías.(Rodriguez Monroy & Durán de Bazúa, 2006).

El Humedal Artificial de Flujo Combinado (HAFC), construido bajo el marco del convenio UNAM-UAM: "Estudios integrales e interdisciplinarios relacionados con la sustentabilidad, la conservación ecológica y la biodiversidad de la zona lacustre de Xochimilco" en las instalaciones del Centro de Investigaciones Biológicas y Acuícolas de Cuemanco (CIBAC), fue construido para promover una respuesta a la problemática del tratamiento de agua del canal de Cuemanco que recibe descargas de aguas negras, lo que propicia un proceso de deterioro en la zona.

El HAFC fue diseñado para que el agua tratada con este sistema cumpla con los límites máximos permisibles de la NOM-001-SEMARNAT-1996 y pueda ser utilizada para riego agrícola restringido.

La operación del HAFC, genera residuos orgánicos que hasta ahora no han sido aprovechados, estos residuos producidos, son plantas producto de la poda del lecho y biosólidos generados en la sedimentación del agua, una de las formas más fáciles de aprovecharlos es utilizarlos para generar composta que se pueda utilizar en los cultivos, y de esta manera se cumple con otra de las condicionantes de agricultura ecológica, que dice que como fertilizantes, pueden utilizarse compostas, lombricompostas y abonos verdes; para llevar a cabo esta tarea de

compostaje, se deben tomar en cuenta los factores más importantes que afectan el proceso de generación de composta, los que pueden inhibir el crecimiento y desarrollo de microorganismos: temperatura, humedad, pH, oxígeno, relación Carbono/Nitrógeno y la población microbiana.

El tren de tratamiento del HAFC consiste en tres etapas:

1. Sedimentación
2. Humedal artificial de flujo combinado
3. Lecho de piedra caliza

En la primera etapa, se busca eliminar los sólidos suspendidos permitiendo que éstos sedimenten en un periodo de seis horas.

En la segunda etapa, las plantas y el material de empaque contribuyen en la remoción de sólidos disueltos y de otros contaminantes también disueltos en el agua.

A la salida del HAFC, el agua tiene las características necesarias para ser utilizada en el riego agrícola, pero si se requiere un mayor tratamiento de ésta, el lecho de piedra caliza permite la precipitación de ortofosfatos solubles asociada con un proceso de desnitrificación en el agua residual; la calidad del efluente de esta última etapa tiene las características necesarias según la NOM-001-SEMARNAT-1996, para la protección de vida acuática.

El HAFC ha resultado ser una ecotecnología funcional para la agricultura, y después de hacer pasar el agua por el lecho de piedra caliza, también brinda un servicio a la acuicultura. Al introducir el agua a otros procesos se podría brindar agua con la calidad necesaria para otro tipo de servicios.

La búsqueda de una mayor eficiencia del HAFC ha sido el inicio de varios trabajos experimentales en los que se han combinado los diferentes factores que intervienen en el tratamiento de agua por este tipo de sistemas: tipo de plantas, medio de soporte, variedad de microorganismos y características hidráulicas.

Los trabajos experimentales han dado como resultado un mejor entendimiento de los procesos de remoción que se llevan a cabo en un humedal artificial y el desarrollo de modelos que permitan describir la acción depuradora de éste.

La acción depuradora del HAFC, permite que este sistema brinde beneficios a la comunidad que utiliza su producto terminal, este tratamiento al agua del canal de Cuemanco evita utilizar agua potable para el riego y para los acuarios de investigación donde se cultiva el ajolote, este uso de agua tratada se traduce en ahorro de agua potable, de energía eléctrica, de construcción de ductos que lleven el agua, entre otros.

La evaluación de los beneficios que otorga el HAFC, puede hacerse con el uso de indicadores ambientales, que según la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) se define como 'un parámetro o valor derivado de parámetros que proporciona información para describir el estado de un fenómeno, ambiente o área con un significado que va más allá del directamente asociado con el valor del parámetro mismo'.

La selección de este indicador ambiental debe estar basada en aquel que integre no sólo los beneficios ambientales que otorga el HAFC, sino también los beneficios sociales y económicos que éste brinda a la comunidad. El indicador que permite el uso de todas estas variables es la 'huella ecológica' que básicamente compara la demanda humana

sobre la naturaleza contra la capacidad de la biosfera para regenerar recursos, en el caso específico del sistema de estudio se evalúa la ayuda que éste brinda a la biosfera para regenerarlos.

Para hacer esta evaluación del HAFC es necesario conocer cuánto *limpia* y cuánto le *ahorra* a la comunidad el tratamiento del agua del canal de Cuemanco, que se traduce en la cantidad de contaminantes que remueve y una comparación entre los costos de instalación, operación y mantenimiento del sistema y el uso de agua potable y energía en las actividades de agricultura y cultivo de ajolotes que se llevan a cabo en CIBAC.

Los resultados del análisis de este sistema en la zona lacustre de Xochimilco D.F., permitirán concluir si la construcción del HAFC ha tenido un impacto positivo, negativo o nulo en la comunidad o si es necesario esperar más tiempo para que la inversión en el proyecto sea despreciable frente a los beneficios que hasta ahora brinda a la comunidad, así como vislumbrar de manera más precisa cual es la magnitud de su contribución en el aumento de la capacidad de carga en dicha zona lacustre.

2. Objetivos

Objetivo general

Determinar la contribución, al aumento de la capacidad de carga de una región, que un humedal artificial experimental aporta, así como las perspectivas de su aplicación en Unidades de Manejo para la Conservación de Vida Silvestre (UMA), construidas en la zona lacustre de Xochimilco, D. F.

Objetivos particulares:

1. Analizar la información relacionada con trabajos experimentales y teóricos desarrollados a partir del HAFC, que sean de utilidad para el cálculo de su huella ecológica.
2. Proponer una metodología para cuantificar el aumento de la capacidad de carga de la zona lacustre de Xochimilco D.F., con la construcción de un HAFC.
3. Definir las perspectivas de humedales artificiales desarrollados en la zona lacustre de Xochimilco D.F, como generadores de agua tratada apta para su uso en Unidades de manejo para la conservación de vida silvestre (UMA), construidas en la misma zona.

3. Marco teórico

Un humedal artificial es un sistema de tratamiento de aguas residuales, donde un soporte como grava o arena, con la ayuda de plantas vasculares y microorganismos interactúan para remover los contaminantes del agua residual.

El soporte en el humedal, sirve como filtro para la mayoría de los sólidos suspendidos en el agua residual, y dependiendo de su tamaño puede modificar el movimiento del agua.

Las plantas estabilizan el material de empaque y proporcionan un excelente medio para la filtración proveyendo una gran área superficial para la adhesión de los microorganismos, y sirven como fuente de nutrientes para los otros microorganismos; forman una biopelícula que contribuye también a la degradación de los contaminantes de agua residual.

Finalmente son los microorganismos los responsables de llevar a cabo la degradación biológica de la materia orgánica, consumen carbono, nitrógeno y fósforo disueltos en el agua, algunos de estos nutrientes se integran al tejido celular produciendo nuevos organismos y la otra parte se transforma en CO₂, nitritos, nitratos o nitrógeno molecular. Los microorganismos más utilizados son bacterias, hongos, protozoos entre otros.

El diseño de los humedales artificiales en general, está basado en criterios de operatividad, calidad del influente y efluente, presencia de nitrógeno y fósforo, así como el tiempo de retención hidráulico.

Los humedales artificiales se pueden clasificar por el régimen hidráulico predominante dentro del sistema, como se presenta a continuación:

- a) Humedales artificiales de flujo libre superficial, el agua siempre se mantiene por arriba del material de soporte y pueden tener plantas que flotan libremente o que sus raíces estén extendidas a lo largo de la columna de agua.
- b) Humedales artificiales de flujo subsuperficial, donde el nivel del agua permanece a pocos centímetros por debajo del nivel del material de soporte, lo que tiene la ventaja de que al estar el agua por debajo del material de soporte, se evita la proliferación de mosquitos y propagación de malos olores.

Este tipo de humedales, se subdividen dependiendo del flujo de entrada del agua a tratar, puede ser flujo horizontal o vertical:

En los humedales artificiales de flujo horizontal, el agua es alimentada por un extremo del sistema de manera que ésta fluye a través del humedal en forma horizontal. La degradación de los contaminantes se lleva a cabo a medida que el agua está en contacto con las raíces de las plantas de manera horizontal, la fuerza de gravedad permite que el agua se deslice.

En los humedales artificiales de flujo vertical, el agua es alimentada de manera uniforme y distribuida a lo largo y ancho de la superficie del humedal, mediante el empleo de una red de tuberías perforadas, colocadas unos cuantos centímetros por encima de la superficie del humedal.

3.1 Humedal artificial de flujo combinado (HAFC) ubicado en el Centro de Investigaciones Biológicas y Acuícolas de Cuemanco (CIBAC)

Los humedales artificiales, tienen la capacidad de brindar agua de excelente calidad, sin necesidad de hacer una gran inversión en su construcción y mantenimiento, además que éstas pueden operar de manera vertical u horizontal y ajustarse a la calidad del efluente

requerida. La construcción de un humedal artificial requiere de gran espacio, así como su continua observación y mantenimiento, para que el efluente siempre tenga la calidad que se planteó en el diseño.

El humedal artificial de flujo combinado de interés para este escrito, fue construido en un lugar con gran extensión de terreno y permite tener constante vigilancia y monitoreo durante su operación; fue construido para que pudiera ser operado con flujo vertical, horizontal o combinado, y así se pudieran hacer posteriores trabajos sobre las ventajas y desventajas de cada uno de los regímenes hidráulicos y la eficiencia de cada uno de ellos.

El lugar seleccionado para la construcción de este sistema de estudio fue el Centro de Investigaciones Biológicas y Acuícolas de Cuemanco, CIBAC, ubicado en el kilómetro N°1 de la Pista Olímpica de Remo y Canotaje "Virgilio Uribe", Cuemanco, delegación Xochimilco, en el Distrito Federal, por medio del convenio UNAM-UAM llamado "Estudios integrales e interdisciplinarios relacionados con la sustentabilidad, la conservación ecológica y la biodiversidad de la zona lacustre de Xochimilco".

El humedal artificial de flujo combinado está diseñado para remover: materia orgánica carbonosa (92%), nitrógeno (85%) y fosfatos (80%); y el efluente es usado para riego hidropónico y llenado de acuarios para la crianza de ajolotes. En la Figura 2, se muestra un diagrama del proceso del HAFC.

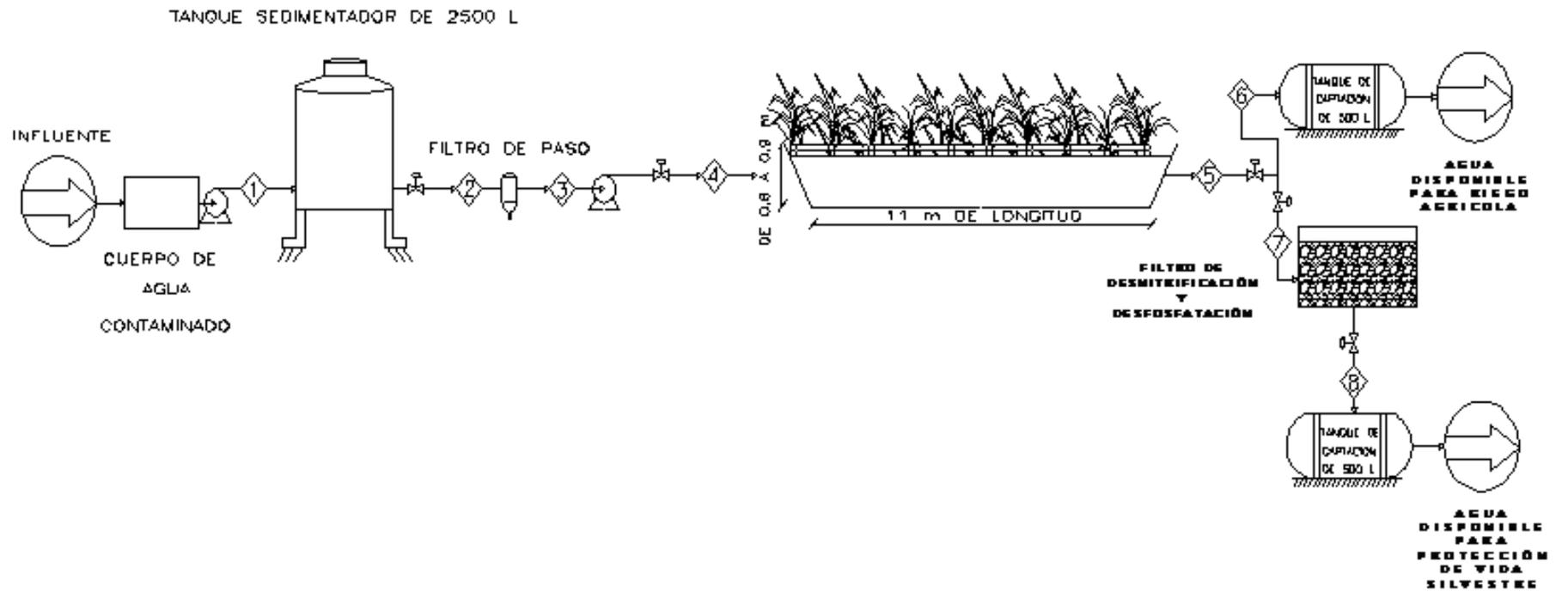


Figura 2. Diagrama de proceso del HAFC. (Sánchez García, 2009)

El agua a tratar proviene del Canal de Cuemanco. Se incorpora a un tanque sedimentador para retirar la materia sólida sedimentable, el agua sobrenadante se introduce al HAFC en donde se reducen de manera significativa los contaminantes orgánicos disueltos y las bacterias presentes. Para efectos de lograr la alta calidad del agua tratada, se alimenta en flujo horizontal y vertical combinados en una misma etapa. Una parte del agua es recolectada en tanques de almacenamiento para su utilización en sistemas agrícolas y la otra pasa a un sistema de remoción de fósforo, del cual se envía a sistemas de manejo y preservación de vida silvestre.

Para este sistema se emplea un filtro de material volcánico seccionado en diferentes horizontes para una mayor eficiencia con base en experimentos de laboratorio elaborados previos a la construcción. Las características del lecho en conjunto con las plantas, conforman la hidráulica del sistema, que a su vez determina el régimen de flujo. Los lechos que se seleccionaron para este sistema proporcionan condiciones óptimas para la conductividad hidráulica y la velocidad de infiltración, las que contribuyen a la determinación de residencia hidráulica requerida por el sistema para la depuración del agua residual.

Para este sistema, se determinaron los materiales y diámetros de partícula mediante pruebas en equipos y columnas piloto en el laboratorio, llegando a la óptima estructura de empaque, presentada en la Tabla 1, con el respectivo volumen y tamaño de partícula que debe ocupar cada material:

Tabla 1. Volumen de material de soporte y tamaño de partículas del sistema de HAFC (Sánchez García, 2009)

Material	Tamaño de Partícula [mm]	Volumen [m³]	Volumen + 20% adicional por posibles mermas [m³]
Dren Superior	20 - 40	2.5	3
Soporte Principal	1 - 2	20	24
Dren Inferior	10 - 20	7.5	9

Para la selección de este material, se consideraron los siguientes puntos:

1. Características, distribución y tamaño de partícula
2. Conformación de la partícula, en términos de la existencia de macro poros
3. Capacidad de adsorción y absorción
4. Porosidad
5. Conductividad hidráulica

La integración de plantas en el lecho es primordial, ya que hacen más efectiva la remoción de la materia orgánica. Este sistema posee características de un sistema de plantas emergentes así como de los humedales de flujo subterráneo. En estos sistemas las raíces de las plantas se encuentran soportadas en un lecho, conformado por gravilla, arena, arcilla u otro material de soporte para las vegetaciones emergentes.

En este lecho se colocaron tres especies diferentes de plantas: carrizos (*Arundo donax*), alfalfa (*Medicago sativa*) y alcatraces blancos (*Zantedeschia aethiopica*).

Los carrizos son plantas vasculares que comúnmente son usadas en los humedales existentes; la alfalfa se estableció como opción, por ser especies altamente viables por su valor como fitorremediadora y a su potencial para servir como subproducto forrajero; el alcatraz, cuenta con un valor comercial como planta de ornato e incrementa las cualidades estéticas del HA, además de poseer cierta capacidad depuradora. El HAFC se dividió en tres secciones de iguales dimensiones para sembrar cada una con una especie, esta forma de sembrarlas se decidió para poder evaluar mediante estudios a futuro el efecto de remoción de cada una. (Luna Pabello & Ramírez Carrillo, 2009)

El HAFC trabaja en 'automático' las 24 horas desde el 25 de mayo de 2007 y es necesario que por lo menos una vez a la semana se limpien ciertos elementos de éste y que se revise que se estén llevando a cabo las cargas necesarias para que el sistema funcione adecuadamente.

El humedal artificial de flujo combinado, está diseñado para entregar agua tratada con los parámetros de sólidos suspendidos totales, sólidos sedimentables, nitrógeno total y fósforo total, que se muestran en la Tabla 2 y 3, donde también se encuentran los valores de los límites máximos permisibles, que exige la NOM-001-SEMARNAT-1996.

Tabla 2. Concentración de sólidos a la salida del lecho del HAFC.
(Sánchez García, 2009)

Contaminante	Concentración a la salida [mg/L]	Límite Máximo Permisible (LMP) NOM-001 [mg/L]
Sólidos suspendidos totales	173.2	150
Sólidos sedimentables	0.59	1

Tabla 3. Concentración de nitrógeno y fósforo total a la salida del lecho y del filtro de pulimento (FP) del HAFC. (Ramírez Carrillo, Luna Pabello, Arredondo Figueroa, & Gallegos Martínez, 2009)

Contaminante	Concentración a la salida del HA [mg/L]	Concentración a la salida del FP [mg/L]	LMP NOM-001 [mg/L]
N-NH ₄	0.56	0.14	-----
N-NO ₃	5.12	0.81	-----
N-NO ₂	0.12	0.06	-----
Nitrógeno Total	5.8	1.01	40
PO ₄ ³⁻	1.88	0.61	-----
Fósforo Total	1.88	0.61	20

3.2 Desarrollo de trabajos experimentales a partir del HAFC

La limpieza del agua residual con humedales artificiales, es resultado de las diferentes acciones que tienen material de soporte, plantas y microorganismos.

El estudio de la acción del material de soporte, en la eficiencia de remoción de contaminantes de agua residual en humedales artificiales, dio origen al trabajo de titulación del Ing. Tenoch González González, que se llevó a cabo en 2011, titulado: "Evaluación de la eficiencia de remoción de carbono, nitrógeno y fósforo en humedales artificiales a escala laboratorio"; donde se evaluó la eficiencia de remoción de carbono, nitrógeno y fósforo en humedales artificiales a escala laboratorio utilizando diferentes arreglos del medio de soporte durante la etapa de arranque, durante ésta no hay presencia notable de microorganismos, lo que hace que la remoción que se lleva a cabo en los humedales se deba a interacciones fisicoquímicas en vez de las que se pudieran dar con los microorganismos que se desarrollan en un sistema de este tipo.

Para el trabajo experimental mencionado, se construyeron 3 tipos de humedales artificiales a escala laboratorio, con los siguientes arreglos:

1. Sistema con un tipo de material de empaque, escoria volcánica, donde el agua fluye de manera horizontal, mostrado en la Figura 3.
2. El flujo sigue la misma trayectoria que en el sistema 1, pero hay tres diferentes materiales de empaque, mencionados en el orden en que los atraviesa el agua: escoria volcánica, grava sílica y roca caliza, mostrado en la Figura 4.
3. En este sistema el flujo del agua es vertical y el arreglo de los tres diferentes tipos de empaque es el mismo que en el sistema número 2, mostrado en la Figura 5.



Figura 3. Sistema 1, con sólo un tipo de material de empaque (González González, 2011)



Figura 4. Sistema 2, con tres tipos de material de empaque (González González, 2011)



Figura 5. Sistema 3, de flujo vertical y con tres tipos de material de empaque (González González, 2011)

En los tres sistemas se colocó la misma especie vegetal *Phragmites australis*, comúnmente conocida como *carrizo*.

Para evaluar la eficiencia de remoción, se introdujo a los sistemas, por lotes, agua residual sintética elaborada con los siguientes parámetros: DQO de 500mg/L, carbono de 120mg/L, nitrógeno de 40mg/L y fósforo de 8mg/L, siguiendo los parámetros típicos de agua residual doméstica.

Empleando estándares internacionalmente aceptados, se determinó DQO, fósforo y nitrógeno en forma de: nitratos (NO_3^-), nitritos (NO_2^-) y nitrógeno amoniacal.

Obteniendo los porcentajes promedio de remoción, citados en la Tabla 4:

Tabla 4. Porcentaje promedio de remoción de contaminantes por cada sistema (González González, 2011)

Parámetro	Sistema		
	1	2	3
DQO	93.33%	97.31%	89.11%
Nitrógeno	59.54%	62.08%	60.62%
Nitrógeno amoniacal	27.97%	23.55%	25.83%
Nitratos	84.52%	72.54%	72.83%
Fósforo	24.20%	28.31%	21.59%

Se concluyó que durante la etapa de arranque se da un porcentaje de remoción alto, por los procesos de absorción del material de empaque y que el sistema con flujo horizontal con tres diferentes medios de soporte (Sistema 2) es el que tiene un mayor porcentaje de remoción.

Finalmente este trabajo incluye algunas de las aplicaciones que se la ha dado a los humedales artificiales en la delegación Xochimilco,

específicamente en la “zona chinampera”, donde se han diseñado y construido para brindar a la comunidad agua con la calidad necesaria para el riego de hortalizas y crianza de ajolotes, lo que les ha permitido gestionar ante las autoridades correspondientes para convertirse en Unidades de Manejo para la Conservación de la Vida Silvestre (UMA), algunos de estos proyectos se ilustran en las siguientes Figuras (6, 7 y 8).



Figura 7. Construcción de un humedal artificial para fines acuícolas (González González, 2011)



Figura 6. Estanques para la reproducción de ajolotes con agua del humedal artificial construido en una chinampa (González González, 2011)



Figura 8. Otro diseño de humedal artificial en la zona chinampera de Xochimilco (González González, 2011)

3.3 Ejercicios de modelación a partir del HAFC

Basándose en la dinámica del HAFC, se desarrolló un trabajo de titulación del M. en C. Sergio Aburto Castañeda, que permitió analizar y modelar el proceso de nitrificación en sistemas experimentales a escala laboratorio que simulan a un humedal artificial.

De manera general, el proyecto abarcó un trabajo experimental que permitió obtener los datos necesarios para tener un análisis, modelación estadística y simulación del proceso de nitrificación.

El trabajo experimental consistió básicamente en:

1. La construcción de cuatro sistemas experimentales a escala laboratorio que simularon un humedal artificial, empacados con el mismo tipo de material:
 - a) Un sistema experimental con inoculación de bacterias nitrificantes y con plantas vasculares *Arundo donax*.
 - b) Un sistema experimental con inóculo de bacterias nitrificantes.
 - c) Un sistema experimental sólo con la planta vascular *Arundo donax*.
 - d) Un sistema experimental testigo sin adición de microorganismo y sin plantas. (Aburto Castañeda, 2011)

Un ejemplo de los sistemas se ilustra en la Figura 9.



Figura 9. Sistema experimental (Aburto Castañeda, 2011)

- e) La selección, lavado y empacado de los sistemas, con arena de SiO_2 , con diámetro de partícula de 1 a 2mm.
 - f) Selección y acondicionamiento de material vegetal, *Arundo donax*.
 - g) Selección, aislamiento y determinación de parámetros cinéticos de bacterias nitrificantes obtenidas a partir de una muestra ambiental.
2. Monitorear cada sistema, cada 7 días durante 167 días, analizando los parámetros citados en la Tabla 5:

Tabla 5. Parámetros a evaluar en los sistemas experimentales. Modificado de (Aburto Castañeda, 2011)

Parámetro	Frecuencia de muestreo	Técnica y equipo
pH	Cada 3 días	Electrodo de pH
Nitrógeno total (Kjeldahl)	Cada 30 días	NMX-AA-026-SCFI-2001
Nitrógeno amoniacal	Cada 7 días	Nesslerización (Clescerl; Greenberg; Eaton, 1989)
Nitratos	Cada 7 días	NMX-AA-079-SCFI-2001 4500 – NO ₃ ⁻ . Cadmium Reduction Method (Clescerl; Greenberg; Eaton, 1999)
Nitritos	Cada 7 días	Método de diazotización de p-nitroanilina (Sreekumar, Narayana, Hegde, Manjunatha, & Sarojini, 2003)
Oxígeno disuelto	Cada 7 días	Electrodo para temperatura
Demanda química de oxígeno (DQO)	Cada 7 días	NMX-AA-030-SCFI-2001 Método 5220 – C. Closed Reflux, Titrimetric Method (Clescerl; Greenberg; Eaton, 1999)
Potencial REDOX	Cada 7 días	Electrodo de platino para potencial REDOX
Biomasa bacterias	Cada 15 días	UFC y por microgoteo
Biomasa vegetal	Cada 30 días	Medición de la longitud y peso de la planta en función del aporte de nutrimentos

A partir de los datos obtenidos en el trabajo experimental, se realizó un análisis estadístico exploratorio para analizar los efectos directos e interacciones que influyeron de forma significativa en el proceso de nitrificación en los sistemas empleados.

Y entonces se pudo hacer el modelo de simulación del proceso de nitrificación, por medio de la interfaz del software de simulación STELLA, que puede ser utilizada para describir y analizar sistemas biológicos,

físicos y/o químicos con cuatro elementos de construcción: stock, flujo, conector y convertidor. (Aburto Castañeda, 2011)

El modelo está compuesto por tres bloques stock (símbolo genérico para cualquier cosa que acumula o consume recursos), para cada producto nitrogenado en el proceso de nitrificación: NH_4^+ , NO_2^- y NO_3^- , que están en función de los modelos de microorganismos y plantas, proveyendo información sobre las tasas de degradación y producción de los diferentes compuestos nitrogenados, así como cinéticas de crecimiento, decaimiento, generación de biomasa y factores físico – químicos que influyen en la dinámica de la nitrificación. (Aburto Castañeda, 2011)

Este ejercicio de modelación permite conocer la velocidad de degradación de los microorganismos, así como su dinámica de crecimiento cuando se encuentran en un humedal artificial, a partir de datos de concentración de compuestos nitrogenados.

El nitrógeno es el segundo contaminante más importante en las aguas residuales domésticas, ya que se descarga en altas concentraciones, es por ello que su remoción, aunque no sea total, es uno de los objetivos principales de cualquier tren de tratamiento de aguas residuales domésticas. Los humedales artificiales ofrecen una alternativa para incrementar la tasa de remoción, es por ello que la comprensión de las diferentes rutas de remoción de nitrógeno ha sido necesaria para modificar el diseño y operación de éstos.

Bajo esta premisa, la Ing. Laura Elena Rosado Lozano desarrolló un trabajo monográfico de actualización, donde analizó la información en materia de modelos matemáticos, desarrollados en los últimos cinco años (2005 - 2010), que simulen la remoción y transformación de compuestos nitrogenados en humedales artificiales de flujo subsuperficial (HAFSS), para así clasificar la información, detectando sus

características, y propuso una metodología para la generación de modelos conceptuales que puedan ser utilizados para plantear modelos matemáticos que simulen el flujo de nitrógeno en HAFSS. (Rosado Lozano, 2010)

En este trabajo monográfico, se revisaron once diferentes modelos desarrollados desde 2005, de los que se observó que la mayoría están orientados a predecir tasas de remoción de los diferentes compuestos nitrogenados, habiendo pocos que describan las transformaciones que se llevan a cabo dentro del humedal artificial y/o que propongan ecuaciones de diseño.

En estos once trabajos revisados, el régimen de flujo más estudiado fue el horizontal subsuperficial (HAFSSH), y sólo se tomaron en cuenta algunos mecanismos de transformación de nitrógeno para el desarrollo de los modelos matemáticos.

La Tabla 6 presenta un resumen del trabajo monográfico revisado, en el que se muestran los diferentes mecanismos de transformación del nitrógeno que los diferentes autores tomaron en cuenta para el desarrollo de sus modelos matemáticos:

Tabla 6. Mecanismos de transformación de nitrógeno utilizados en las investigaciones (Rosado Lozano, 2010)

Autor	Mayo y Bigambo, 2005	Howell et al., 2005	McGehan et al., 2005	Howell et al., 2005	Liu et al., 2005	Hafner y Jewel, 2006	Tunçsiper et al., 2006	Chan et al., 2008	Akratos et al., 2009	Wang et al., 2009	Sklarz et al., 2010
Amonificación											
Nitrificación											
Desnitrificación											
Fijación											
ANAMMOX											
Volatilización											
Adsorción											
Sedimentación											
Asimilación											
Descomposición											
Regeneración											

Finalmente, en el trabajo monográfico se presenta una propuesta para generar modelos matemáticos que simulan el flujo de nitrógeno en un HAFSS.

La cual consiste principalmente en las siguientes etapas, resumidas en la Figura 10:

1. Establecer los límites de tiempo y espacio
2. Gestar el modelo
3. Desarrollar el modelo
4. Probar el modelo
5. Comparar y validar el modelo matemático (Rosado Lozano, 2010)

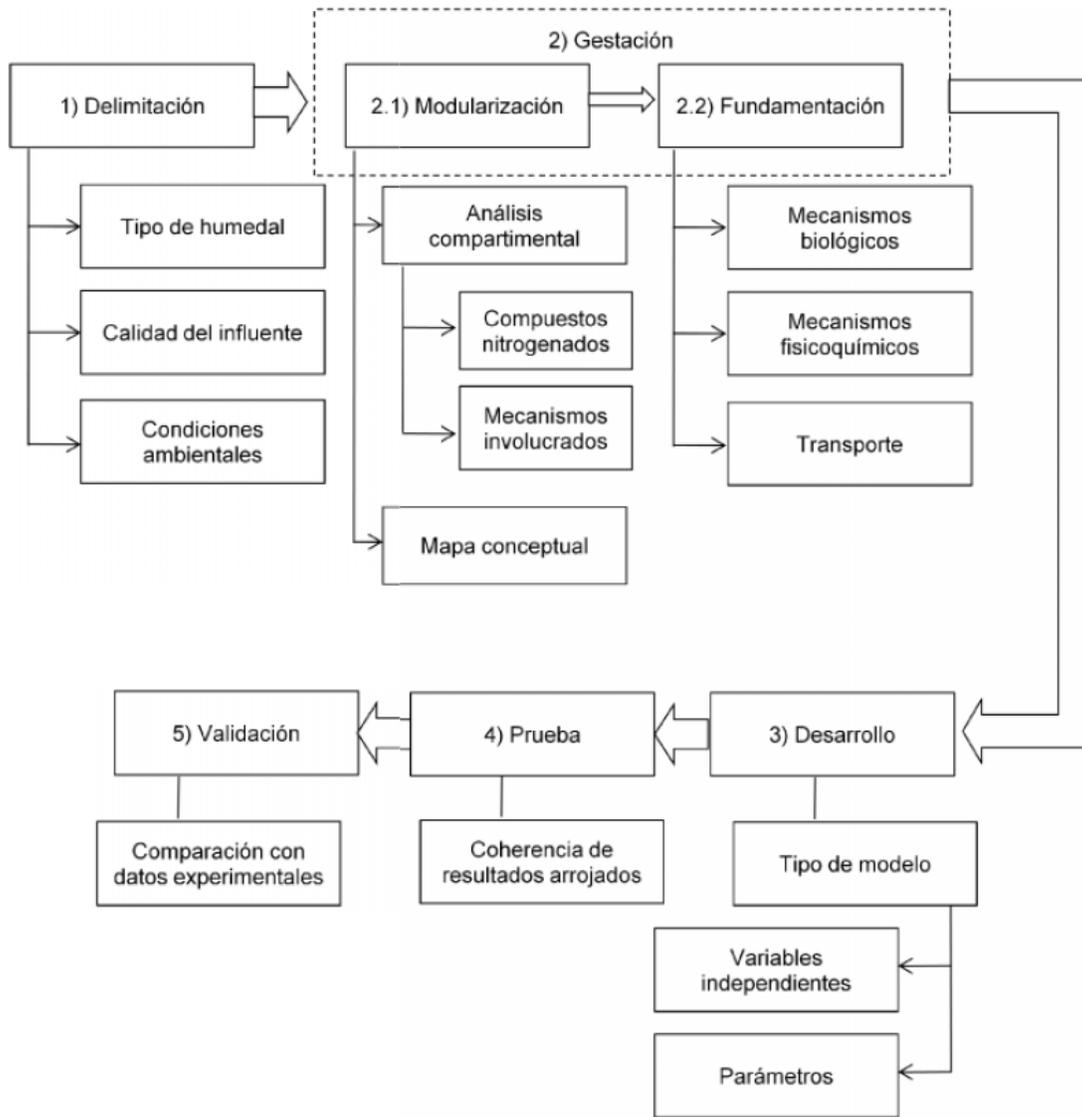


Figura 10. Propuesta de algoritmo para generar modelos matemáticos que simulan el flujo del nitrógeno en HAFSS (Rosado Lozano, 2010)

3.4 Indicadores de impacto ambiental

El estudio, y la generación de nuevos conocimientos a partir de un humedal artificial, han permitido proponer cambios de operación en el HAFS construido en las instalaciones de CIBAC y han sido base de nuevos diseños para la construcción de humedales en la zona chinampera de Xochimilco, como se refirió en el apartado 3.2 y se ampliará posteriormente.

El HAFC construido en CIBAC, ha tenido un efecto directo sobre la calidad del agua del canal de Cuemanco y su operación uno indirecto sobre la economía de las personas que hacen uso de los productos y subproductos que éste genera, los insumos, productos y subproductos se pueden observar claramente en la Figura 11.

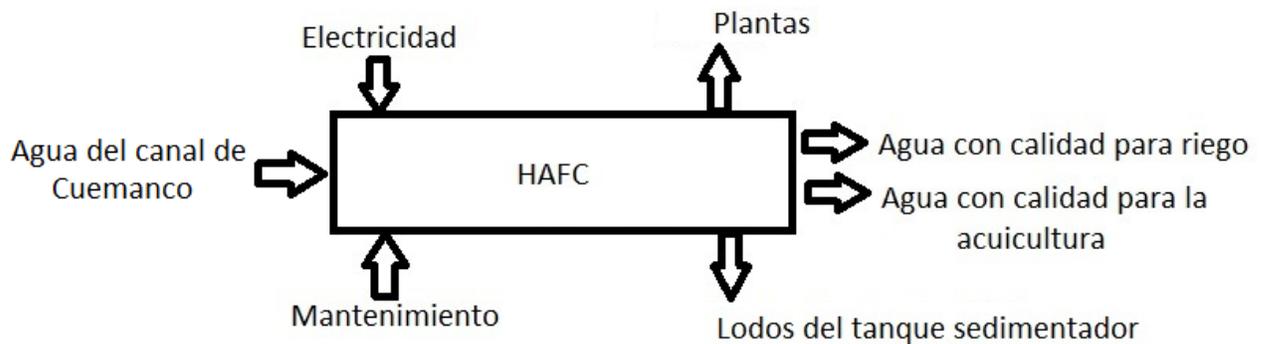


Figura 11. Esquema del balance de materia del HAFC construido en CIBAC

Todos los efectos positivos o negativos en la alteración de la calidad del medio ambiente llevan el nombre de impactos ambientales, señalados en la Tabla 7:

Tabla 7. Impactos ambientales de los insumos, productos y subproductos del HAFC

Impactos Ambientales		
Insumos	Agua del canal de Cuemanco	Calidad del cuerpo de agua
	Electricidad	Consumo
	Mantenimiento	Consumo de agua potable y otros recursos para dar el mantenimiento adecuado.
Productos	Agua con calidad para riego	En el consumo de agua potable
	Agua con calidad para la acuicultura	
Subproductos	Plantas	Venta de éstas como ornato, forraje o como materia prima para artesanías.
	Lodos del tanque sedimentador	Materia prima para mejorador de suelos y/o composta

La forma de conocer el efecto de los impactos en el ecosistema, es a través de indicadores, que se utilizan para determinar la calidad ambiental o el cambio de ésta, asociado a una determinada acción, se denominan *indicadores de impacto ambiental*.

Para elegir el indicador adecuado, es necesario que sus resultados sean fáciles de interpretar, y por ende sean de utilidad.

3.5 Huella ecológica

Los indicadores de impacto ambiental, se pueden clasificar dependiendo de la propiedad que los define y su relación con la propiedad del ecosistema que se quiere valorar, Garmendia y colaboradores, hacen la siguiente clasificación:

1. Indicadores de causa
2. Indicadores de efecto
3. Indicadores de calidad ambiental

Y desde un punto de vista práctico, hace la siguiente clasificación:

- a) Indicadores de alarma o de aviso
- b) Indicadores de sensibilidad
- c) Indicadores de integración

En esta última es en la que se encuentra enmarcado un indicador de impacto ambiental que analiza la sustentabilidad de las acciones humanas, la *huella ecológica*, que sus autores, William Rees y Mathis Wackernagel, definen como:

“El área de territorio ecológicamente productivo (cultivos, pastos, bosques o ecosistema acuático) necesario para producir los recursos utilizados y para asimilar los residuos producidos por una población definida con un nivel de vida específico indefinidamente, donde sea que se encuentre esta área”.

Para hacer el cálculo, es necesario definir un área de estudio y un período de tiempo, para el período fijado, se obtiene la información del consumo de la población para cubrir sus necesidades.

Las necesidades de la población de estudio se dividen en: alimento, materia prima, suelo y energía, estos consumos se enlistan y especifican en la Tabla 8.

Tabla 8. Consumo de la población en diferentes categorías, para el cálculo de la Huella Ecológica

	Terrenos productivos [unidades de área]	Productos del terreno
Alimento	Espacio acuático	Productos pesqueros
	Terreno de pastos	Pastoreo de ganado Producción avícola
	Campos de cultivo	Alimentos Materias primas
Materia Prima	Campos de cultivo	Forrajes
	Superficie forestal	Madera
Suelo	Territorio construido	Áreas urbanizadas Áreas industriales
	Área de absorción	Para absorber el CO ₂ que se produce en la producción de energía
	Σ Terrenos productivos	

$$Huella Ecológica = \frac{\sum \text{Terrenos productivos}}{\text{Número de habitantes del área}} [=] \frac{\text{unidades de área}}{\text{habitante}}$$

Por ejemplo, si se elige la delegación de Xochimilco, es preciso conocer, cuánto se consume anualmente en la zona, de los productos que se mencionan en la Tabla 9:

Tabla 9. Consumo de la población de la Delegación Xochimilco, en diferentes categorías, para el cálculo de la Huella Ecológica*

Productos	Categorías	[kg/año]
Alimenticios	Carne y huevo	31'084,572.6 ^{*a)}
	Leche	48'638,820.4 litros/año ^{*b)}
	Pescado	6'531,807.1 ^{*c)}
	Productos agrícolas	273'002,984 ^{*d)}
Materia prima	Forraje	33,027'812,760 (SIACON, 2010)
	Madera	35,851.63m ³ /año ^{*e)}
Suelo	Casas construidas	102,750 casas (INEGI, 2011)
	Industrias construidas	No hay información
	Energía	655,685.72MWh ^{*f)}

*El origen de los datos de esta tabla, se explica en el apéndice A.

En seguida se convierte la cantidad de insumos de la población en hectáreas de terreno productivo, haciendo uso de los índices de productividad (ver apéndice B), valores que se muestran en la Tabla 10:

Tabla 10. Terreno productivo calculado, para los consumos de la población

	Terrenos productivos	[km²/año]
Alimento	Espacio acuático	11,070.86
	Terreno de pastos	30,027.64
	Campos de cultivo	8.25
Materia Prima	Campos de cultivo	747.05
	Superficie forestal	1,272.69
Suelo	Territorio construido	45.38
	Área de absorción	524.55
	Σ Terrenos productivos	43,696.42

El cálculo de la huella ecológica puede ser muy sencillo, como el ejemplo que se presenta, hasta volverlo de una gran complejidad, dependiendo de cuántos parámetros se tomen en cuenta para hacerlo.

El cálculo que se presenta no está contabilizando algunos impactos como la contaminación del suelo, del agua o la erosión. Tampoco el desgaste del suelo por las actividades agrícolas o ganaderas.

Después de obtener los datos, se utiliza la ecuación:

$$\begin{aligned}
 \text{Huella Ecológica} &= \frac{\sum \text{Terrenos productivos}}{\text{Número de habitantes del área}} \\
 &= \frac{43,696.42 \text{ km}^2}{415,007 \text{ habitantes} \cdot \text{año}} = \frac{0.11 \text{ km}^2}{\text{habitante} \cdot \text{año}} = \frac{105,290.80 \text{ m}^2}{\text{habitante} \cdot \text{año}}
 \end{aligned}$$

La huella ecológica, permite tener una idea muy gráfica de lo que se necesita para satisfacer las necesidades básicas de un habitante de la delegación Xochimilco.

Si se considera una cancha de futbol para partidos internacionales, de 110m de largo por 75m de ancho, es decir con una superficie de 8,250m², para cumplir con las necesidades básicas de un habitante de la delegación Xochimilco, se necesitan 12.76 canchas de futbol de las mencionadas dimensiones, resultado que se ilustra en la Figura 12.

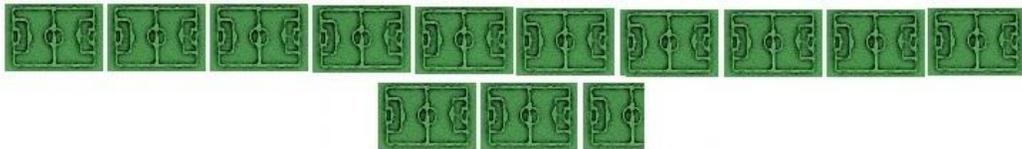


Figura 12. Huella ecológica de un habitante de la delegación Xochimilco

Para poder saber si las actividades que se llevan a cabo en una región son capaces de satisfacer las necesidades de sus pobladores es necesario comparar la huella ecológica calculada con la capacidad que tiene la región de estudio para producir sus propios recursos esta capacidad se llama *capacidad de carga ambiental*, que se muestra en la Tabla 11.

Tabla 11. Terrenos productivos reportados de la delegación Xochimilco (INEGI, 2011)

	Terrenos productivos	[km²/año]
Alimento	Espacio acuático	0.0
	Terreno de pastos	7.62
	Campos de cultivo	77.23
Materia Prima	Campos de cultivo	4.83
	Superficie forestal	0.0
Suelo	Territorio construido	25.75
	Área de absorción	2.20
	Σ Terrenos productivos	117.63

$$\begin{aligned}
 \text{Capacidad de Carga Ambiental} &= \frac{\sum \text{Terrenos productivos}}{\text{Número de habitantes del área}} \\
 &= \frac{117.63 \text{ km}^2}{415,007 \text{ habitantes} \cdot \text{año}} = \frac{0.00028 \text{ km}^2}{\text{habitantes} \cdot \text{año}} = \frac{280 \text{ m}^2}{\text{habitante} \cdot \text{año}}
 \end{aligned}$$

Es decir una treintava parte de una cancha de futbol, que se ilustra fácilmente en la Figura 13.

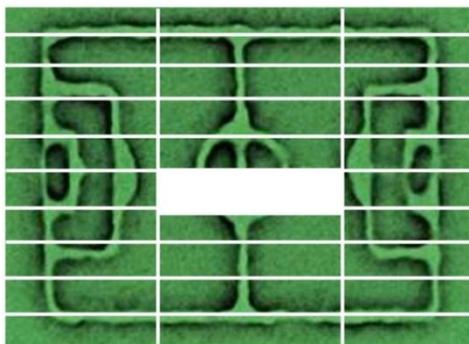


Figura 13. Capacidad de carga de la delegación Xochimilco

Las Figuras 12 y 13, hacen muy fácil la interpretación de los resultados, lo que hace del indicador de huella ecológica, uno de mucha utilidad.

Si:

Huella ecológica > Capacidad de carga ambiental, la región presenta un déficit ecológico, es decir requiere de los recursos de otras regiones para satisfacer las necesidades básicas de su población.

Huella ecológica ≤ Capacidad de carga ambiental, la región es autosuficiente.

Es evidente, que en este caso la huella ecológica tiene un valor mucho más alto que la capacidad de carga ambiental de la localidad, lo que indica que ésta presenta un déficit ecológico muy alto, y es necesario buscar estrategias que permitan reducirlo.

3.6 Perspectivas para el HAFC

La comparación del indicador de Huella Ecológica con la Capacidad de Carga Ambiental de la región de estudio (Xochimilco), que se presentó en el apartado anterior y se contrasta con valores en la Tabla 12, hace evidente la necesidad de buscar soluciones para hacer menor la diferencia entre estos dos valores.

$$Huella\ Ecológica = \frac{105,290.80m^2}{habitante \cdot año}$$

$$Capacidad\ de\ Carga\ Ambiental = \frac{280m^2}{habitante \cdot año}$$

$$\therefore Huella\ Ecológica \gg Capacidad\ de\ Carga\ Ambiental$$

La reducción de esta diferencia, puede darse al reducir la Huella Ecológica, o aumentar la Capacidad de Carga Ambiental de la Región.

La primera de estas opciones incluiría necesariamente la disminución de los productos que consumen los pobladores de la región, lo que implicaría llevar a cabo acciones que no sean necesariamente viables.

La otra alternativa, aumentar la Capacidad de Carga Ambiental de la región, implicaría aumentar los terrenos productivos.

Tabla 12. Comparación de los terrenos productivos necesarios y existentes

	Terrenos productivos	Huella Ecológica por región [km²/año]	Capacidad de Carga Ambiental de la región [km²/año]
Alimento	Espacio acuático	11,070.86	0.0
	Terreno de pastos	30,027.64	7.62
	Campos de cultivo	8.25	77.23
Materia Prima	Campos de cultivo	747.05	4.83
	Superficie forestal	1,272.69	0.0
Suelo	Territorio construido	45.38	25.75
	Área de absorción	524.55	2.20
	Σ Terrenos productivos	43,696.42	117.63

De acuerdo al análisis que se realizó anteriormente, la región de estudio no cuenta con espacio acuático, ni superficie forestal para obtener madera como materia prima; es necesario aumentar el terreno apto para pastoreo, para el cultivo de materia prima, para la construcción y para la plantación de árboles y plantas capaces de absorber el dióxido de carbono que producen las actividades y habitantes de la región.

A pesar de las deficiencias en la capacidad de carga de la región, Xochimilco presenta la gran ventaja de tener una gran cantidad de territorio destinado al cultivo de alimentos, según los datos calculados, esta región es al menos 9 veces mayor a la que se requiere por habitante.

La construcción de humedales artificiales en la región de estudio, permitiría tener agua apta para riego y acuicultura, lo que permitiría el desarrollo de terrenos productivos para espacio acuático; el uso de las

plantas en los humedales artificiales, contribuye al aumento del área de absorción de CO₂ y de terrenos de campos de cultivo de materia prima (forraje).

Actualmente se han diseñado y construido varios humedales artificiales en la zona, que permiten el uso del agua de los canales de la región, en actividades productivas como la crianza de especies endémicas de Xochimilco y el riego de productos agrícolas.

Hasta este momento, los oriundos de la región que han decidido construir y poner en marcha un humedal artificial, utilizan el agua ya tratada por éste para la crianza de especies endémicas de Xochimilco, lo que les ha permitido inscribirse en el *Sistema Nacional de Unidades de Manejo para la Conservación de la Vida Silvestre*¹.

Este uso del agua tratada, ha permitido que más personas de la zona se interesen en la construcción de humedales artificiales en sus terrenos, lo que ha permitido que el diseño de estos sistemas evolucione respecto a las necesidades de cada usuario y posibilidad de espacio y recursos económicos.

La Universidad Autónoma Metropolitana campus Xochimilco (UAM-X), participa en un convenio colaboración, con SEMARNAT, para el proyecto denominado "Fomento de Unidades de Manejo para la Conservación de Vida Silvestre" (UMA), el cual plantea la conservación y producción de *Ambystoma mexicanum* en las instalaciones del Centro de Investigaciones Biológicas y Acuícolas de Cuemanco (CIBAC). Así como el fomento, la conservación y el aprovechamiento sustentable del *Ambystoma mexicanum* en su hábitat, implementando programas de participación social directa en las actividades productivas y

¹ Unidades de Manejo para la Conservación de la Vida Silvestre, se explicará en el siguiente apartado.

reintroducción en lugares previamente estudiados dentro de la zona lacustre de Xochimilco.

La UAM-X y el CIBAC interesados en el mejoramiento y manejo de la calidad del agua y su implementación en el proyecto "Reproducción y conservación de *Ambystoma mexicanum* en las Instalaciones (CIBAC)-UAM-X con la Participación de las Comunidades rurales de Xochimilco" han solicitado asesoría técnica al Laboratorio de Microbiología Experimental de la Facultad de Química de la UNAM a través del coordinador del CIBAC el Biólogo Fernando Arana Magallón, para seleccionar tecnologías de tratamiento y manejo del agua en tres zonas propuestas por el CIBAC-UAM-X dentro de la zona lacustre de Xochimilco. (Pabello & Castañeda, 2010)

A continuación, se muestran fragmentos del proyecto desarrollado por el laboratorio de microbiología experimental para seleccionar las tecnologías, manejo y abastecimiento de agua apta para la conservación y aprovechamiento del *Ambystoma mexicanum* en los posibles centros de reproducción dentro de la zona lacustre de Xochimilco, que se encuentran marcados con puntos rojos en la Figura 14.



Figura 14. Ubicación de las tres localidades de estudio de la Zona lacustre de Xochimilco (Luna Pabello & Aburto Castañeda, 2010)

1. Primera localidad, Sra. Marina

Este terreno, mide aproximadamente 50m de largo por 15m de ancho, colinda con el canal principal y tiene un canal secundario que corre a lo largo de un costado de la chinampa, que tiene vegetación emergente (tule) y flotante (lentejuela de agua y lirio entre otras), se puede apreciar una fotografía de este terreno en la Figura 15.

Se pretende instalar cinco estanques con capacidad de 8m^3 cada uno, para la producción de *Ambystoma mexicanum*, por lo que los estanques requieren un recambio total de agua por semana, lo que implica un abastecimiento de 40m^3 por semana.



Figura 15. Superficie de la primera localidad (Luna Pabello & Aburto Castañeda, 2010)

Para esta localidad, se propuso instalar dos barreras filtrantes con grava, con una longitud de 1m y una profundidad de 0.8m cada una.

La conformación de estas barras se propone que sea de 50cm de grava de 1/2in y 50cm de grava de 1/4in.

La vegetación flotante se recomienda que sea lechuguilla de agua, lenteja de agua, o cualquier otra especie de libre flotación que se encuentre en la localidad, exceptuando lirio acuático que produciría un incremento de azolvamiento del sistema.

Se presenta un esquema de este tren de tratamiento en las Figuras 16 y 17.

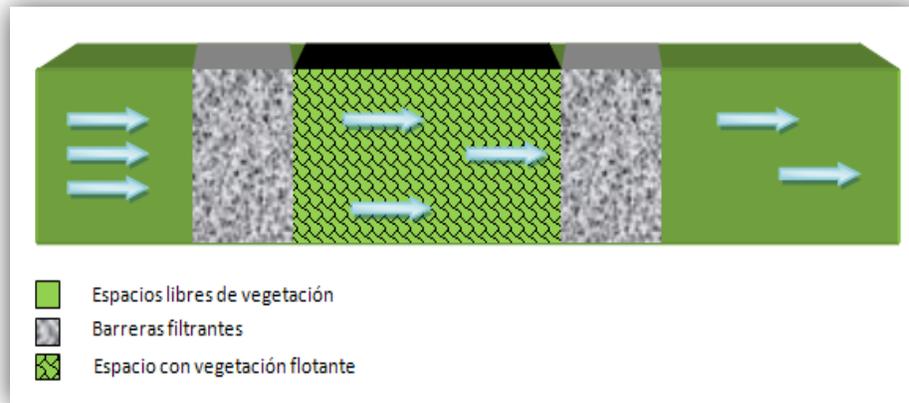


Figura 16. Diseño conceptual del sistema de barreras filtrantes en la primera localidad de Xochimilco (Luna Pabello & Aburto Castañeda, 2010)

Después de las barreras filtrantes, se recomienda instalar un tanque sedimentador y un lecho filtrante de 72m^2 , y una profundidad de 0.8m .

El tanque de captación de agua tratada, se prevé que tenga un volumen de $1\ 000\text{L}$, ya que el sistema entregará un volumen de 6m^3 de agua por día.

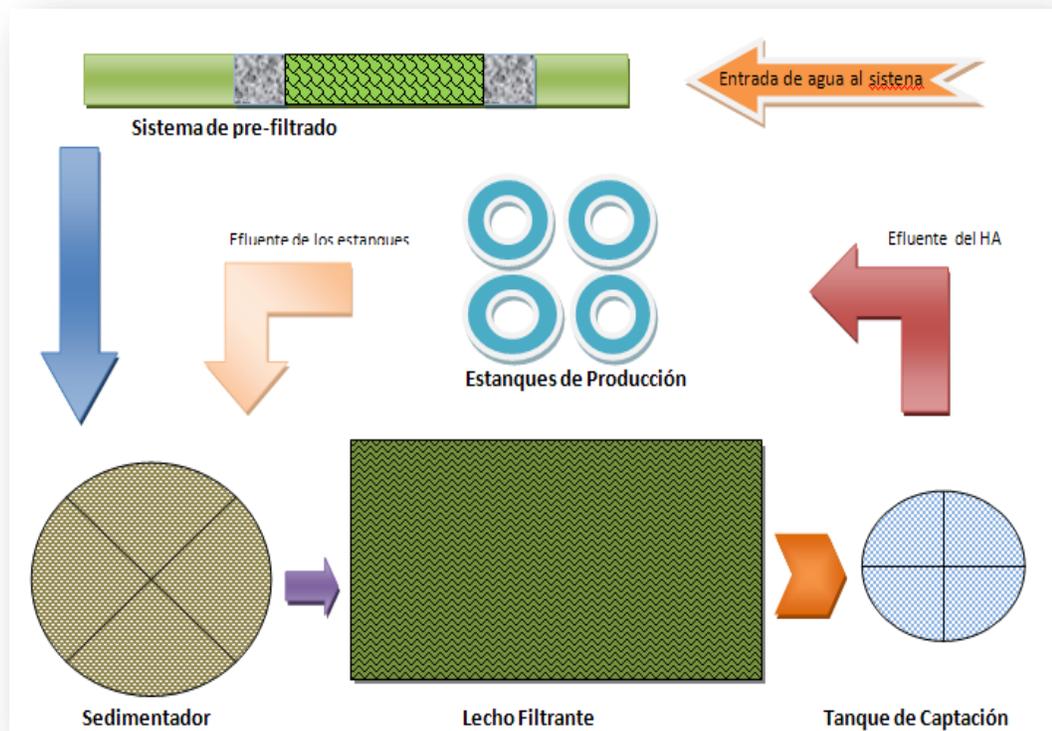


Figura 17. Diseño conceptual de un sistema de HA para la primera localidad visitada en Xochimilco (Luna Pabello & Aburto Castañeda, 2010)

2. Segunda localidad, Sr. Leonardo

Este terreno tiene una extensión de 50m por 45m colinda con el canal de Apamplico y lo circunda un canal secundario y azolvado en una tercera parte de su extensión. En este terreno se llevan a cabo actividades de pastoreo y cultivo de temporal, se puede apreciar una fotografía de éste en la Figura 18.

En esta localidad se pretende rehabilitar el canal secundario en su totalidad, con el objetivo de realizar pruebas de reintroducción de especies endémicas del lugar, por lo que se debe implementar un sistema depurador que reduzca la carga de sedimentos contenida en el agua proveniente del canal principal.



Figura 18. Imágenes de la chinampa de la segunda localidad (Luna Pabello & Aburto Castañeda, 2010)

En esta localidad se recomienda sólo el uso de barreras filtrantes, con una longitud de 1m y una profundidad de 0.80m, que reduzcan la concentración de sólidos y eviten la incursión de organismos nocivos para el *Ambystoma mexicanum*, el diseño conceptual se ilustra en la Figura 19.

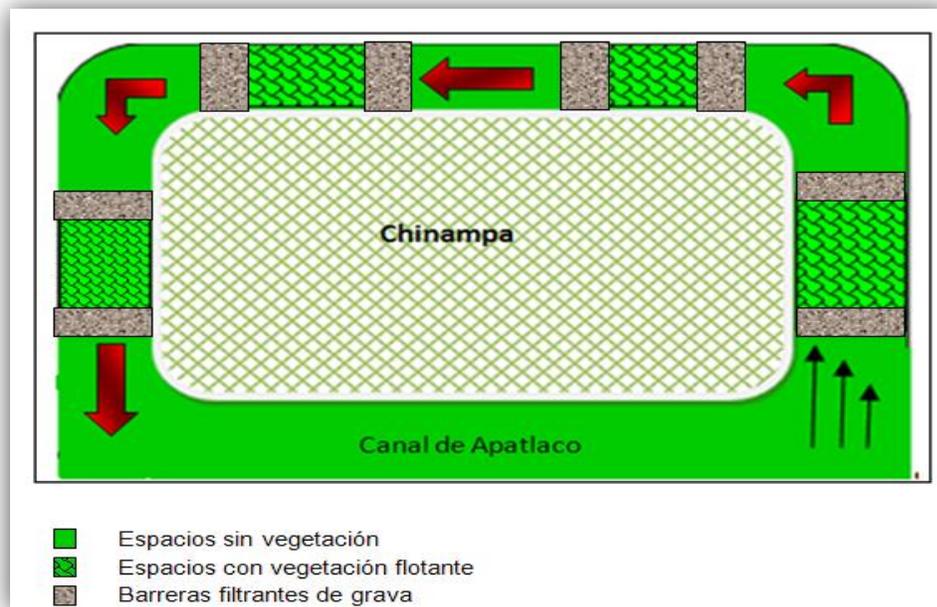


Figura 19. Diseño conceptual del sistema de barreras filtrantes en la segunda localidad (Luna Pabello & Aburto Castañeda, 2010)

El tipo de vegetación que se recomienda, es de libre flotación: lechuguilla de agua, lenteja de agua, o cualquier otra especie de libre flotación que se encuentre en la localidad. No se recomienda el uso de lirio acuático ya que conlleva problemas de azolvamiento y el aumento de la biomasa al descomponerse, incrementa la carga de contaminantes en el agua.

No se recomienda el uso de plantas emergentes, tule o carrizos, ya que producirían un azolvamiento en el sistema y en los alrededores, ya que este tipo de plantas se reproduce rápidamente.

3. Tercera localidad, Sr. Abel

Se encuentra cerca del canal Tlilac, con una extensión aproximada de 60m por 50m, fotografías de este terreno se aprecian en la Figura 20, carece de energía eléctrica y tiene un área de cultivo de autoconsumo.

Dentro de la localidad, se encuentran 4 estanques, los que son alimentados por un canal lateral que corre a lo largo de la chinampa.

Tres de los estanques tienen una dimensión aproximada de 5m x 4m y el otro (al que desembocan los tres primeros) tiene una dimensión de 10m x 4m.

Anteriormente se utilizaron los estanques para la conservación de especies acuáticas nativas del lugar y actualmente están abandonados. Se pretende que en esta chinampa se lleve a cabo la reproducción y conservación del ajolote *Ambystoma mexicanum*.



Figura 20. Azolvamiento de canales y estanques en la tercera localidad (Luna Pabello & Aburto Castañeda, 2010)

Para esta localidad, se propone colocar barreras filtrantes de 1m de largo y profundidad de 0.80m, con vegetación de libre flotación, de las mismas características que la propuesta en las otras dos localidades, se presenta un esquema de la propuesta en la Figura 21.

Se recomienda instalar las barreras filtrantes a la salida de los estanques, para evitar verter el agua proveniente de éstos directamente a los canales de la zona.

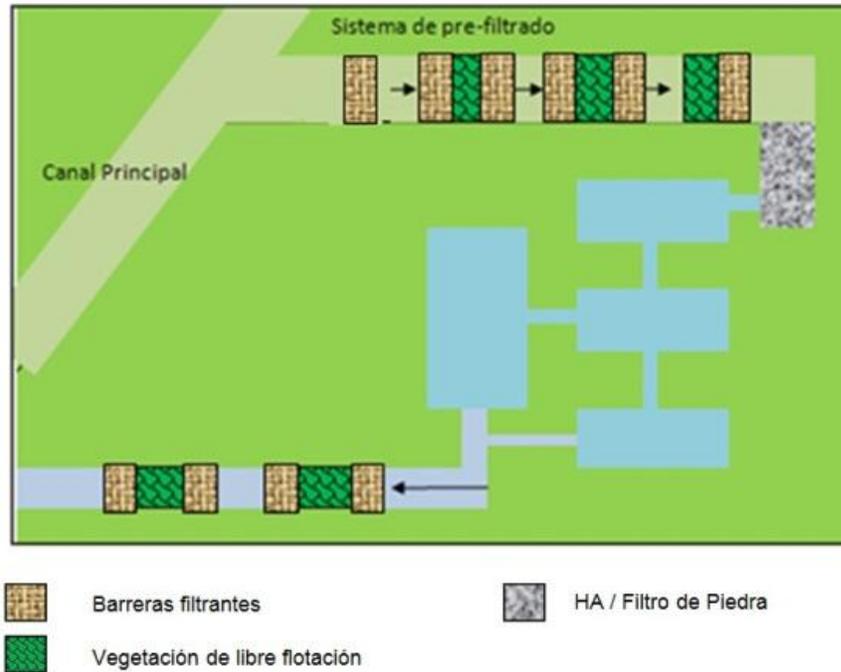


Figura 21. Esquema conceptual del sistema de depuración recomendado para la tercera localidad. (Luna Pabello & Aburto Castañeda, 2010)

La construcción de estos humedales artificiales, permitió que los dueños de los terrenos, los vuelvan productivos y regrese el interés hacia el cuidado de esta zona del Distrito Federal.

Este interés permite un mayor cuidado al área, y la plantación de nuevos árboles que favorezcan la absorción de dióxido de carbono y la búsqueda de nuevas especies para su siembra y su uso como superficie forestal o cultivo de materias primas.

Aunque en ninguno de los ejemplos se utiliza el agua para riego, es posible utilizar el agua para esta actividad y cumplir con los lineamientos de la norma ambiental para el Distrito Federal NADF-002-RNAT-2002, que establece las condiciones para la agricultura ecológica en el suelo de conservación del Distrito Federal y así dar a los productos cosechados de la región un valor agregado al precio del producto.

El diseño de los humedales artificiales toman en cuenta todas las condiciones de la zona, la falta de electricidad, de agua potable, para permitir que el ingreso del agua del canal, así como su salida pueda darse por pendientes, y evitar el uso de bombas que consuman energía eléctrica.

Los costos generados del diseño y la construcción de los humedales artificiales tienen costos que van desde los \$7,500.00 hasta los \$72,350.00 (Pabello & Castañeda, 2010) dependiendo del tipo de material que se utilice, así como la extensión de las construcciones. Estos costos, no toman en cuenta la operación del sistema, ya que puede llevarse a cabo por los usuarios del humedal artificial.

Los humedales artificiales tienen un tiempo de vida útil de hasta 20 años, lo que permite recuperar el costo de la inversión inicial y tomando en cuenta los costos de operación y mantenimiento, el precio por metro cúbico de agua tratada oscila entre \$1.04 y \$1.82, para humedales artificiales diseñados por el Laboratorio de Microbiología Experimental, de la Facultad de Química, campus CU de la Universidad Nacional Autónoma de México.

El Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, en 1999, publicó una tabla en la que compara los costos de tratamiento para una población de 10,000 habitantes, que se muestra en la Tabla 13:

Tabla 13. Comparación de costos por m³ de agua tratada por proceso de tratamiento.

Proceso	Costos [\$/m ³]			
	Inversión	Operación y mantenimiento	Indirectos	Total
Tratamiento avanzado, remoción de nitrógeno y fósforo	5.26	2.59	0.90	8.75
Aereación extendida	2.85	1.90	0.58	5.33
Lodos Activados	2.74	1.50	0.57	4.81
Filtros biológicos	2.83	1.15	0.58	4.56
Primario con adición de cal	2.11	1.90	0.43	4.44
Primario con adición de sulfato de aluminio	2.34	1.36	0.49	4.19
Zanjas de oxidación	1.87	1.18	0.39	3.44
Tratamiento primario	1.41	0.91	0.30	2.62
Tratamiento anaerobio	1.41	0.75	0.28	2.44
Humedales artificiales	1.18	0.40	0.13	1.71
Lagunas facultativas con impermeabilización	1.23	0.30	0.12	1.65

La Comisión Nacional del Agua, tiene registradas hasta 2010, 723 plantas de tratamiento que tiene como proceso principal el uso de lagunas de estabilización y en segundo lugar 629 con el proceso de lodos activados; de humedales artificiales se tiene un registro de 66 plantas que utiliza el proceso. (Comisión Nacional del Agua, 2010)

Se puede observar que los costos de inversión, operación y mantenimiento e indirectos, en los humedales artificiales son más bajos que los que se tienen registrados para plantas de tratamiento con Lodos Activados, y aunque tienen un costo 3.51% más alto que los de las

lagunas facultativas con impermeabilización, los humedales artificiales, por todo lo descrito en este trabajo, brindan un beneficio ambiental mucho más alto.

3.7 Unidades de manejo para la conservación de vida silvestre (UMA)

La Ley General de Vida Silvestre, en su artículo 3º, párrafo XXXII, define a las Unidades de Manejo para la Conservación de Vida Silvestre (UMA) como “los predios e instalaciones registrados que operan de conformidad con un plan de manejo aprobado y dentro de los cuales se da seguimiento permanente al estado del hábitat y de poblaciones o ejemplares que ahí se distribuyen”.

La creación de las Unidades de Manejo para la Conservación de Vida Silvestre, fue una respuesta a la pérdida acelerada de la riqueza biológica del País y pertenecen a una estrategia contenida en el Programa de Conservación de la Vida Silvestre y diversificación Productiva en el Sector Rural, establecido en 1997 por la Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca SEMARNAP, que en noviembre del año 2000, dio origen a la actual Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales SEMARNAT.

El programa se basa principalmente en el trabajo de los legítimos dueños de la tierra, para que sean los precursores de la conservación de especies silvestres. Para ello, da certeza jurídica a los propietarios sobre el derecho de uso y usufructo de los recursos de vida silvestre que existen en su propiedad, siempre y cuando se comprometan en su conservación y protección. Para llevar a cabo esta tarea, las propiedades toman el nombre de “Unidades”, donde se visualiza de manera integral y dinámica a las especies, poblaciones, comunidades ecológicas y

ecosistemas, junto con la presencia del hombre, sus intereses y sus necesidades.

El artículo 39, del capítulo VIII, de la citada Ley, describe que "(...) las unidades de manejo para la conservación de vida silvestre, serán el elemento básico para integrar el Sistema Nacional de Unidades de Manejo para la Conservación de la Vida Silvestre, y tendrán como objetivo general la conservación de hábitat natural, poblaciones y ejemplares de especies silvestres. Podrán tener objetivos específicos de restauración, protección, mantenimiento, recuperación, reproducción, repoblación, reintroducción, investigación, rescate, resguardo, rehabilitación, exhibición, recreación, educación ambiental y aprovechamiento sustentable".

La selección de especies de vida silvestre que se incluyen en estas UMA, depende de varios factores, entre los que destacan:

1. Su existencia en alguna categoría de riesgo.
2. Su factibilidad de recuperarlas y manejarlas.
3. Si producen un efecto de protección indirecta que permite conservar a otras especies y sus hábitats.
4. Si poseen un grado de interés cultural o económico.

Para llevar a cabo esta selección existen Comités Consultivos Técnicos Especializados por Especie, que son avalados por la autoridad competente.

Las UMA's operan bajo dos modalidades: manejo intensivo (de especies), en éstas, las especies sujetas a manejo se encuentran libres en el predio, además de que se alimentan y resguardan bajo las condiciones naturales y sólo ocasionalmente se les proporciona alimento o cobijo; o extensivo (de hábitat) como los viveros, jardines botánicos y

zoológicos. Esta clasificación no significa que no pueda haber unidades que incluyan ambos tipos de manejo.

La operación de las UMA's se basa en los siguientes elementos:

- a) Registro de la unidad.
- b) Plan de manejo de la unidad.
- c) Censos y monitoreos de las especies de interés para la unidad.
- d) Aprovechamiento controlado.
- e) Certificado de la producción.
- f) Vigilancia participativa.

Hasta junio de 1998, se habían registrado 1,449 UMA's, las cuales integran criaderos, viveros, jardines botánicos y zoológicos. Dentro de estas unidades se reproducen y propagan ejemplares de flora, fauna y hongos silvestres, generándose productos y subproductos destinados a la conservación, investigación, repoblación, educación y aprovechamiento. (SEMARNAT, Informe de la Situación del Medio Ambiente en México, 2002).

Para noviembre de 2008, se tenían registradas 8,859 Unidades, lo que representa una extensión de 30.9 millones de hectáreas (un 15.7% de la extensión del territorio Nacional), se han establecido predominantemente en el norte del país. (SEMARNAT, Informe de la Situación del Medio Ambiente en México, 2008). En la Figura 22, se aprecia una gráfica denotando el crecimiento de las UMA's, de 1995 a 2008 y en la Figura 23, se ilustran las regiones del País con mayor número de UMA's registradas.

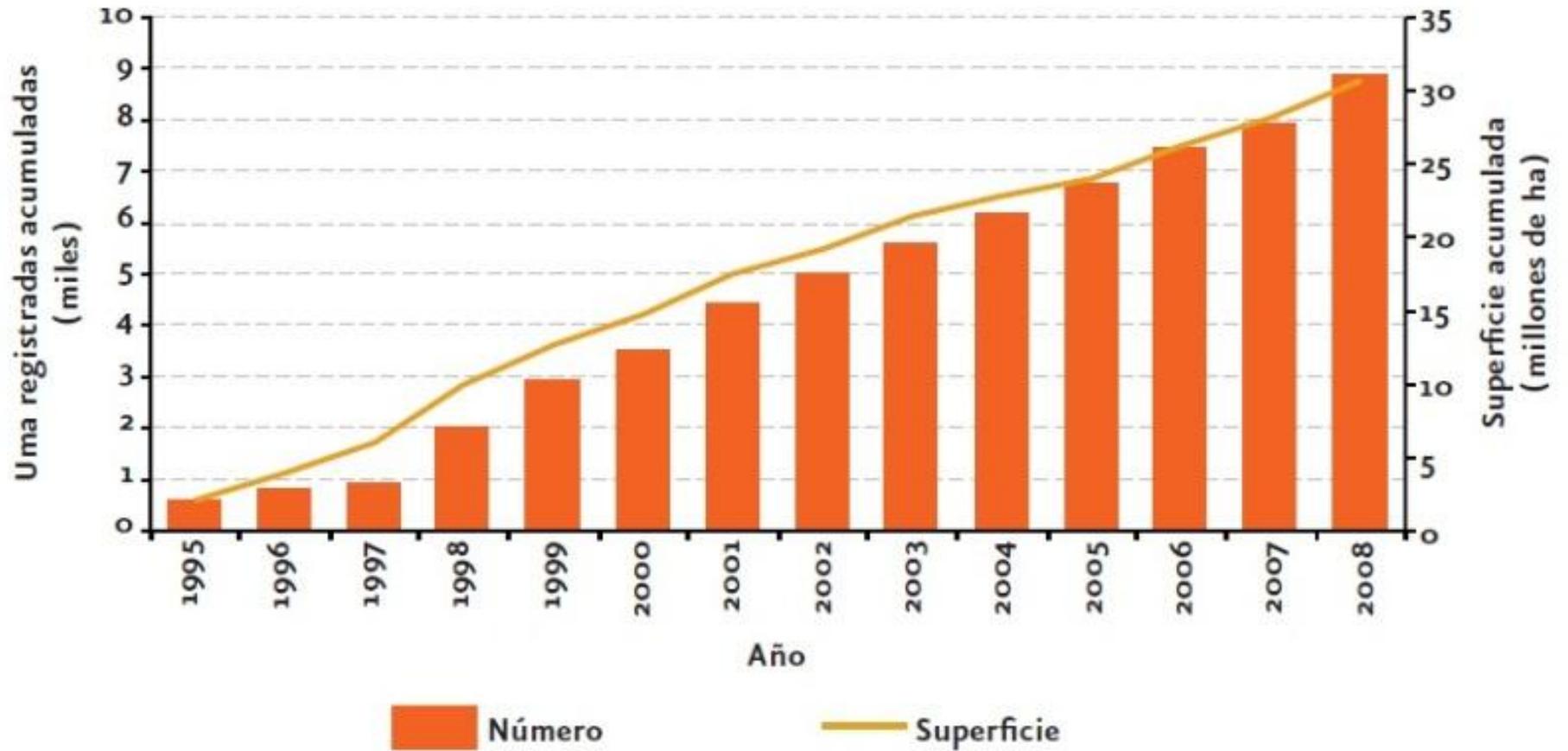


Figura22. Superficie y número de UMA registradas, 1995-2008. (SEMARNAT, Informe de la Situación del Medio Ambiente en México, 2008)

Las especies que crecen en una UMA, son utilizadas de dos formas básicamente: para la conservación o para el aprovechamiento. En el segundo caso, las especies son certificadas a través de un sistema de marcaje, y un permiso de aprovechamiento, permitiendo que se comercialice con la especie en un mercado legal, certificado y sustentable, que puede ser nacional o internacional.

Las UMA, han sido una buena alternativa para los "agronegocios" a través de la modalidad de rancho cinegético. En Sonora, se tienen registradas 1,409 UMA, con una superficie total de 7.66 millones de hectáreas, lo que representa para los productores un ingreso adicional, al permitir una caza controlada de algunas especies como el borrego cimarrón, venado cola blanca, entre otros (Retes López, Cuevas González, Moreno Medina, Denogean Ballesteros, Ibarra Flores, & Martín Rivera, 2010).

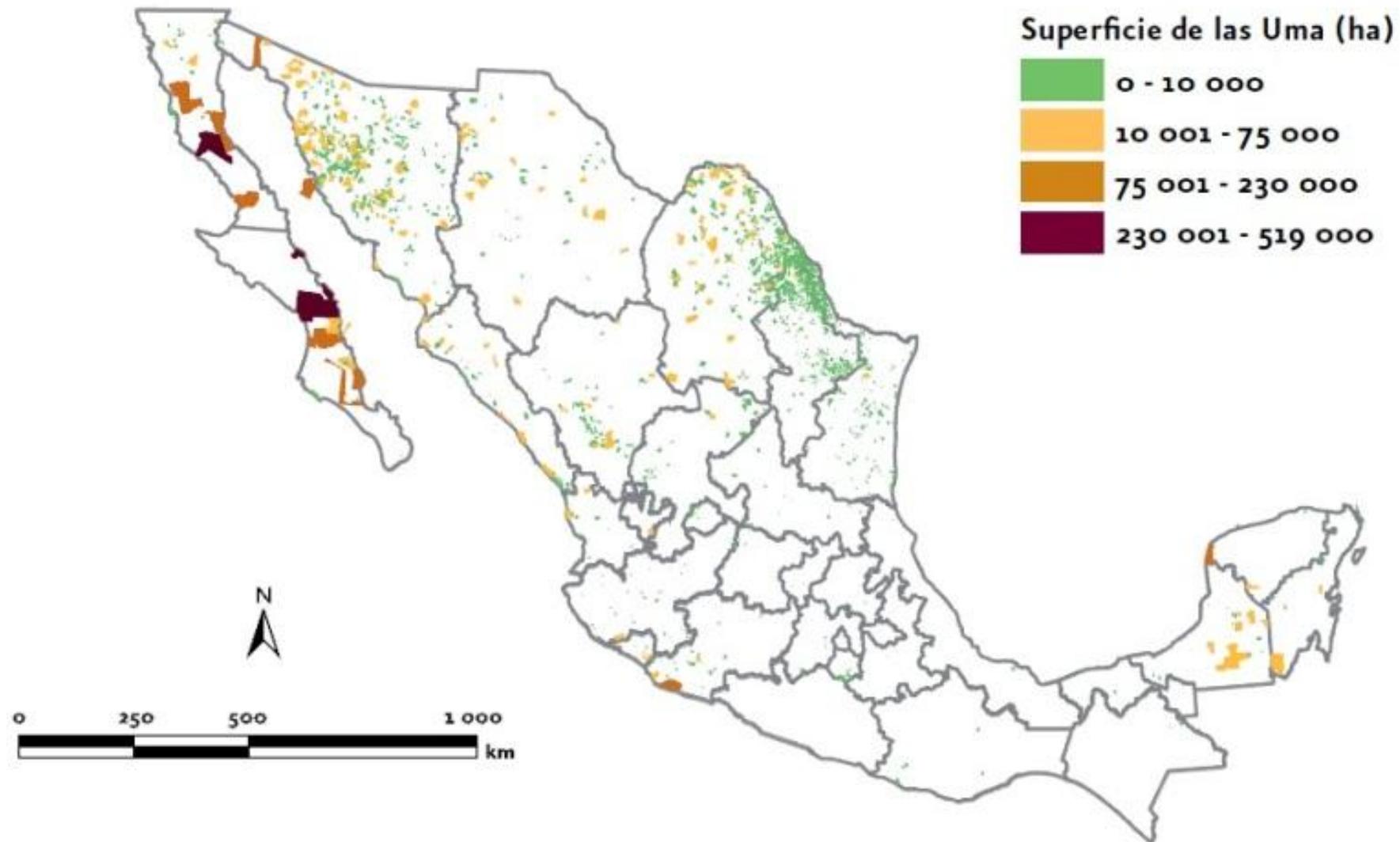


Figura23. Unidades de Manejo para la conservación de la vida silvestre UMA, en 2008 (SEMARNAT, Informe de la Situación del Medio Ambiente en México, 2008)

Cualquier ciudadano propietario de un predio, puede convertirse en titular de una UMA, es la SEMARNAT, a través de la Comisión Nacional Forestal CONAFOR, la que otorga a los titulares de las UMA, el derecho al aprovechamiento y la responsabilidad en la preservación del hábitat y las especies que ahí habitan. Todo esto se logra mediante el cumplimiento del llamado Plan de Manejo, el cual es elaborado por el responsable técnico y requiere, después de su análisis, de la autorización de la SEMARNAT para iniciar su funcionamiento.

Para obtener la aprobación de su manejo, se debe incluir un plan de contingencia, el cual contendrá medidas de seguridad, preventivas y emergentes para incidentes que pudieran desplazar a otras especies.

El Plan de Manejo, debe garantizar la conservación de los ecosistemas, sus elementos y viabilidad y permanencia de las poblaciones de especies existentes dentro del predio en que se realizará el aprovechamiento, con especial énfasis en aquellas que serán sujetas a algún tipo de aprovechamiento.

Cada plan de Manejo, es preparado en función de los objetivos de la UMA y está sujeto a verificación periódica.

Una vez registrada y aprobada ésta, es evaluada en función de los indicadores siguientes:

1. Resultados de las medidas de manejo del hábitat y poblaciones establecidas en el plan de manejo.
2. Cumplimiento del calendario de actividades.
3. Efectividad de las medidas de contingencia y de los mecanismos de vigilancia.
4. Eficiencia de los sistemas utilizados para el aprovechamiento, en caso de que se realice.

5. Eficacia y seguridad del sistema de marca para identificar los ejemplares, partes y derivados, cuando se trate de liberaciones o aprovechamientos.
6. Repercusiones económicas que se deriven de las actividades realizadas. (SEMARNAT, 2009)

4. Metodología

En una comparación de la Huella Ecológica y la Capacidad de Carga de la región, calculadas en el capítulo anterior, y señaladas en la siguiente Tabla 14, es sencillo identificar que la mayor necesidad de esta delegación, es aumentar las superficies destinadas a la crianza de especies acuáticas y las superficies forestales, ya que no se cuenta con área registrada para llevar a cabo esta actividad.

Tabla 14. Comparación de la Huella Ecológica con la Capacidad de Carga de la Región, en km²/año

	Terrenos productivos	Huella Ecológica por región [km²/año]	Capacidad de Carga de la región [km²/año]
Alimento	Espacio acuático	11,070.86	0.0
Materia Prima	Superficie forestal	1,272.69	0.0
	Área de absorción	524.55	2.20
Materia Prima	Campos de cultivo	747.05	4.83
Alimento	Terreno de pastos	30,027.64	7.62
Suelo	Territorio construido	45.38	25.75
Alimento	Campos de cultivo	8.25	77.23
	Σ Terrenos productivos	43,696.42	117.63

En seguida, pero sin ser menos importante, se encuentra la necesidad de aumentar las áreas de absorción de CO₂, que en este estudio se limita su cuantificación a la emisión de este gas a causa de la

generación de energía eléctrica; el aumento de las áreas en donde se cultive materia prima y alimento para el ganado.

Finalmente, también es necesario aumentar la superficie destinada para la construcción de casas habitación, aunque en esta delegación, aumentar áreas destinadas para este fin, resulta más complicado por contar con áreas denominadas: Suelo de Conservación, que reducen el espacio que podría ser destinado a desarrollos habitacionales.

Las superficies destinadas al cultivo de productos para consumo humano directo, son notablemente mayores a las que requiere la delegación, por lo que se puede concluir que no todo el alimento cosechado en la región es consumido en la misma.

La construcción del HAFC en las instalaciones de CIBAC, contribuye al aumento de las superficies destinadas a las actividades que se requieren para satisfacer las necesidades cuantificadas de la población de la delegación Xochimilco, en el Distrito Federal.

Específicamente, se trata de las siguientes superficies:

1. Las destinadas a la crianza de especies acuáticas para consumo humano directo e indirecto.
2. Las empleadas como superficies forestales, en las que se siembra y cosecha un bien que será la materia prima de una actividad secundaria.
3. Las empleadas como áreas de absorción, donde la cosecha es capaz de absorber dióxido de carbono, en el caso específico de este trabajo, el CO₂ que se cuantifica por la generación de energía eléctrica para la población.

4. Las destinadas a campos de cultivo, en los que la cosecha sea para consumo humano indirecto; es decir, que son empleadas para alguna actividad primaria.

Las superficies para pastoreo de ganado y construcción de casas habitación, no pueden ser ampliadas con el uso de un humedal artificial y aunque sería posible cultivar alimentos en el sistema de estudio, es necesario considerar los contaminantes que éstos pueden absorber y transmitir a sus consumidores.

4.1 Espacio acuático

La superficie destinada al espacio acuático se incrementa al hacer viable la instalación de estanques que ya no necesitan de agua potable para la crianza de especies acuáticas para consumo humano.

Algunos de los estanques empleados en la zona para esta actividad, tienen una capacidad de 8m^3 , agua que debe ser recirculada cada semana, lo que significa 417.14m^3 de agua al año, agua potable que puede ser remplazada con el agua tratada por el HAFC, que es capaz de servir $2,190\text{m}^3$ de agua con la calidad necesaria para esta tarea.

Dependiendo de la cantidad de especies que se críen en estos estanques, los 75m^2 que abarca el HAFC y el filtro de pulimento, son suficientes para aumentar la capacidad de carga del CIBAC, construyendo por lo menos cinco estanques como los ya construidos en la zona lacustre, permitiendo la crianza de especies acuáticas, de consumo humano directo e indirecto.

4.2 Superficie forestal

Para cuantificar la superficie forestal disponible en la región de Xochimilco, se tomaron en cuenta los datos existentes de superficies donde se encuentren árboles que pueden ser utilizados como materia

prima para alguna actividad, como la fabricación de muebles o el uso de esta madera como combustible.

El HAFC junto con el filtro de pulimento, tiene un área total de 75m^2 , en los que se tienen plantaciones de carrizos (*Arundo donax*), alfalfa (*Medicago sativa*) y alcatraces blancos (*Zantedeschia aethiopica*).

El HAFC, cuenta con carrizos sembrados en su superficie (17.6m^2), que pueden ser considerados como superficie forestal, al ser plantas que pueden ser utilizados como materia prima para la elaboración de artículos de decoración.

4.3 Campos de cultivo

Las superficies destinadas a campos de cultivo, se dividen en las que se emplean para cultivar alimentos y las que se destinan a cultivar materia prima.

Como ya se describió con anterioridad, el HAFC cuenta con plantaciones de alfalfa y alcatraces blancos, cada uno con una superficie de 17.6m^2 .

La alfalfa, además de ser una especie altamente viable por su valor como fitorremediadora, potencialmente puede ser utilizada como subproducto forrajero.

El alcatraz, cuenta con un valor comercial como planta de ornato e incrementa las cualidades estéticas del HA, además de poseer cierta capacidad depuradora.

Sumando las áreas que corresponden en el HAFC para ambas especies, se obtienen 35.2m^2 , de superficie destinada a campos de cultivo de materia prima.

4.4 Área de absorción

Finalmente la suma de las tres especies sembradas en el HAFC (52.8m²) contribuye a la absorción de CO₂; la cantidad que absorben las especies vegetales utilizadas en el sistema, dependerá de las especies que se utilicen y el área en la que éstas sean distribuidas para la remoción de contaminantes de los canales de la zona.

La fijación de CO₂, está en sincronía con la etapa de crecimiento de las plantas, en promedio, las plantas de un humedal absorben alrededor de 1,000 a 2,000 gC/m²·año (Kadlec & Wallace, 2009).

El HAFC, tiene una superficie de plantas de 52.8m², absorbiendo una cantidad anual de CO₂, de entre 0.0528 a 0.1056 toneladas.

5. Resultados y discusión

El abatimiento de la huella ecológica es un proceso complicado en el que interfieren factores sociales que pueden no ser viables ni probables. En estos procesos, la construcción de un humedal artificial puede hacer que cambien los hábitos de consumo de una población, más no que disminuyan.

La población debe tener más responsabilidad sobre su consumo, teniendo en cuenta los recursos que se utilizan para producir cada consumible y disponerlo; cada uno de nosotros debe actuar responsablemente sobre su huella ecológica y tratar de disminuirla, sin embargo los hábitos de consumo en los que nos desarrollamos, a veces hacen difícil llevar a cabo esta concientización y reducción de consumo.

La degradación de una región por la extracción de materias primas, tiene que ver con la cantidad que consume la población, y el hecho de que esta extracción se hace irresponsablemente, sin permitirle a la región recuperarse, extrayendo mucho más de lo que permite la zona, rebasando su capacidad de carga.

La construcción de humedales artificiales, puede hacer el cambio sobre el impacto que tiene la huella ecológica de una población sobre una región, ya que estos sistemas aumentan su capacidad de carga.

El HAFC, es un ejemplo de lo que la construcción de un Humedal Artificial puede significar en la Zona Lacustre de la delegación Xochimilco, retomando los proyectos planteados en el capítulo 3.6 *Perspectivas para el HAFC* así como los diseños de humedales artificiales propuestos en el *"Proyecto: Selección de tecnologías para la depuración y manejo del agua con fines acuícolas en localidades propuestas por el CIBAC-UAM-X dentro de la zona lacustre de Xochimilco"*, se extrapolan

acontinuación los beneficios que la construcción de estos sistemas brindan a la sociedad, aumentando la capacidad de carga ecológica de la región:

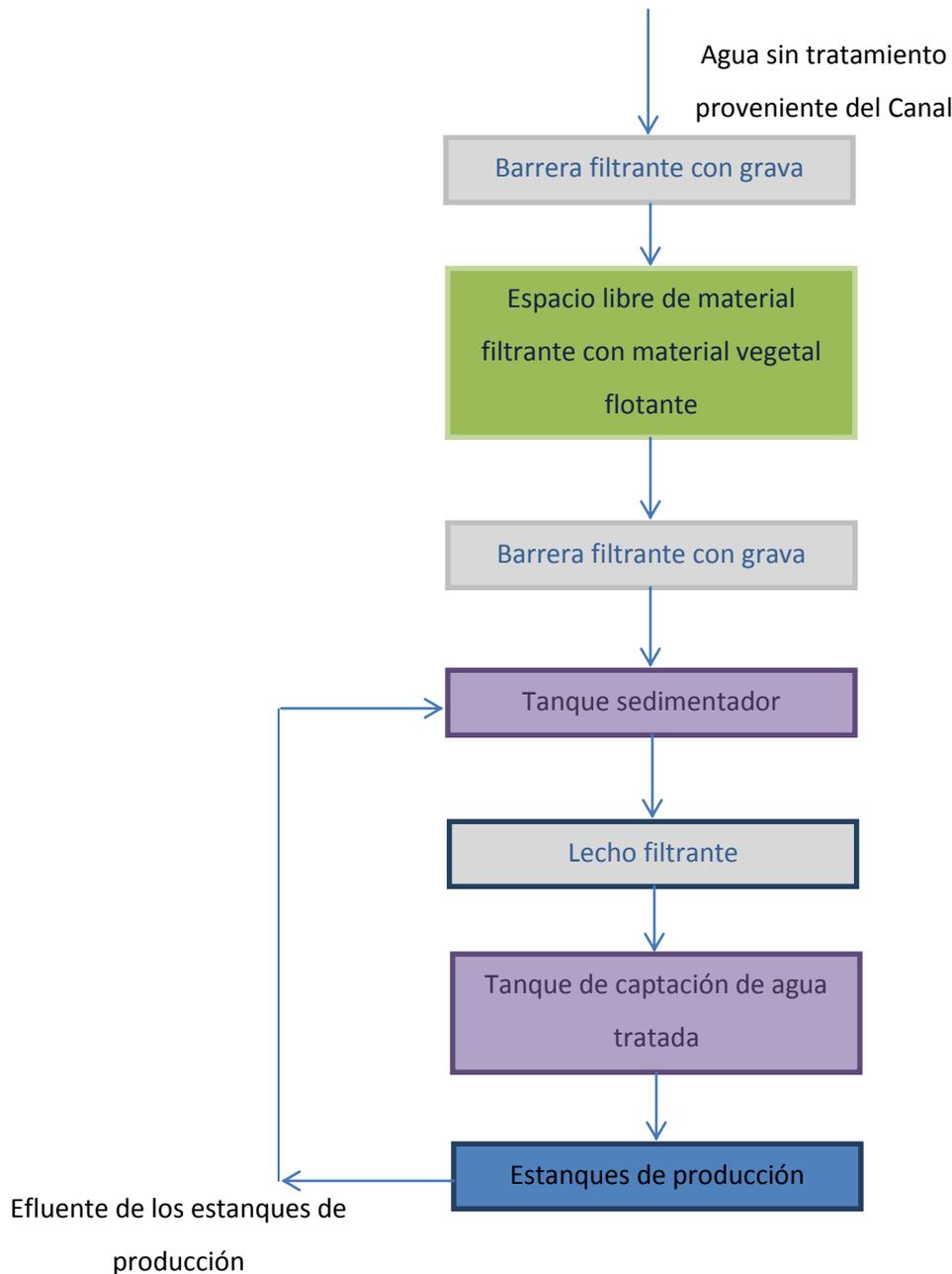


Figura24. Diagrama de flujo del tren de tratamiento para la primera localidad. (Luna Pabello & Aburto Castañeda, 2010)

El efluente del tren de tratamiento mostrado en la Figura 24, tiene dos aportaciones importantes a la capacidad de carga de la región.

- a) El aumento de los terrenos productivos destinados a espacio acuático, ya que con una superficie de 79m^2 , se trata el agua suficiente para instalar cinco estanques de 8m^3 para la producción de especies acuáticas.
- b) El aumento de áreas de absorción de CO_2 generado por la producción de electricidad, con los 5m^2 destinados a la vegetación flotante en el pre tratamiento del agua del Canal, se puede contar con plantas que aumenten la absorción de dióxido de carbono de la zona.

Además de estas dos aportaciones, la vegetación flotante puede ser utilizada como forraje para animales que se crían en la región, aunque para esto es necesario conocer la cantidad de contaminantes que son capaces de absorber y el porcentaje de acumulación que podrían ocasionar en los animales de pastoreo; si después de hacer este análisis se decide utilizar como forraje, esto daría un aumento en los terrenos productivos destinados a "Terreno de pastos".

Los terrenos productivos que se ven afectados con el uso de un humedal artificial en esta primera localidad, se muestran en la Tabla 15.

Tabla 15. Terreno productivo que se ve afectado con la construcción del humedal artificial diseñado para la primera localidad.

	Terrenos productivos	Huella Ecológica por región [km²/año]	Capacidad de Carga Ecológica de la región [km²/año]	¿Afecta a la cantidad de terreno productivo?
Alimento	Espacio acuático	11,070.86	0.0	Si
Materia Prima	Superficie forestal	1,272.69	0.0	No
	Área de absorción	524.55	2.20	Si
Materia Prima	Campos de cultivo	747.05	4.83	No
Alimento	Terreno de pastos	30,027.64	7.62	No
Suelo	Territorio construido	45.38	25.75	No
Alimento	Campos de cultivo	8.25	77.23	No
	Σ Terrenos productivos	43,696.42	117.63	Si

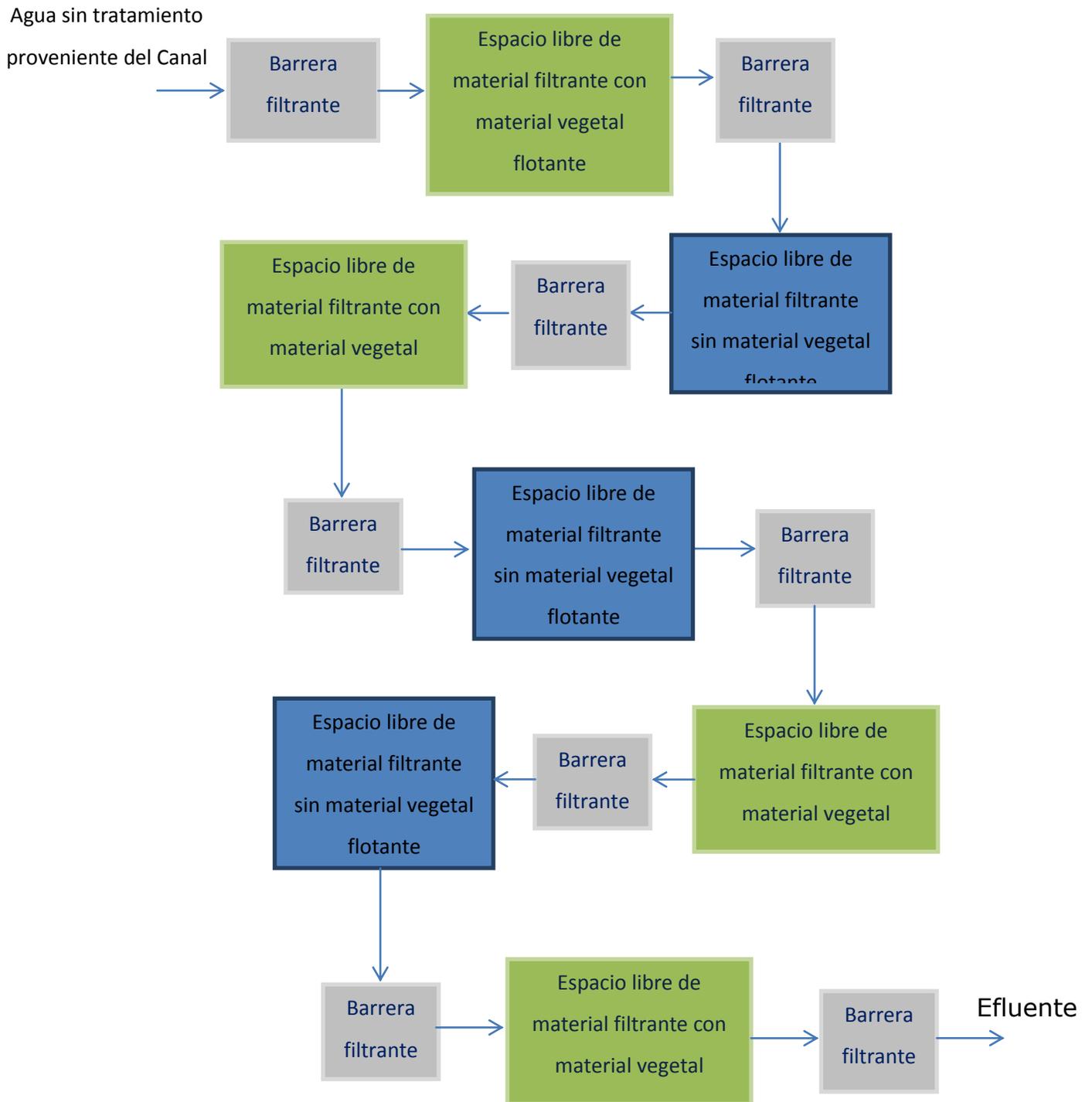
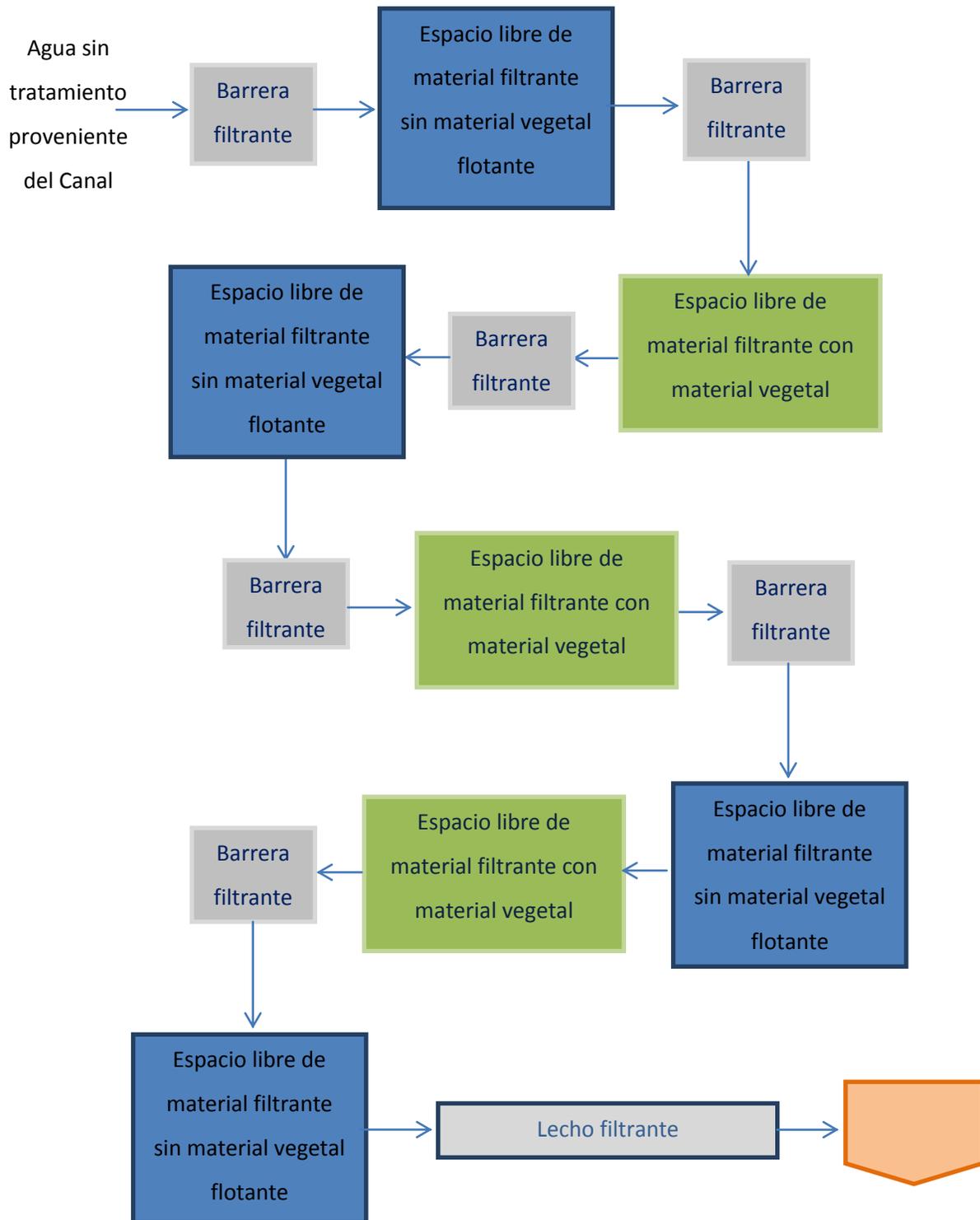


Figura25. Diagrama de flujo del tren de tratamiento para la segunda localidad (Luna Pabello & Aburto Castañeda, 2010).

El tren de tratamiento mostrado en la Figura 25, requiere el empleo de por lo menos 4m² de material vegetal flotante, que permitiría aumentar el área de absorción de CO₂ que se emite en la región por la generación de electricidad. Como en el ejemplo de la localidad anterior, es posible emplear esta materia flotante como alimento para los animales de pastoreo, sin embargo es necesario determinar la acumulación de contaminantes que la planta puede absorber y la posibilidad de que éstos sean transmitidos a sus consumidores, los terrenos productivos que se ven afectados, se muestran en la Tabla 16.

Tabla 16. Terreno productivo que se ve afectado con la construcción del humedal artificial diseñado para la segunda localidad.

	Terrenos productivos	Huella Ecológica por región [km²/año]	Capacidad de Carga Ecológica de la región [km²/año]	¿Afecta a la cantidad de terreno productivo?
Alimento	Espacio acuático	11,070.86	0.0	No
Materia Prima	Superficie forestal	1,272.69	0.0	No
	Área de absorción	524.55	2.20	Si
Materia Prima	Campos de cultivo	747.05	4.83	No
Alimento	Terreno de pastos	30,027.64	7.62	No
Suelo	Territorio construido	45.38	25.75	No
Alimento	Campos de cultivo	8.25	77.23	No
	Σ Terrenos productivos	43,696.42	117.63	Si



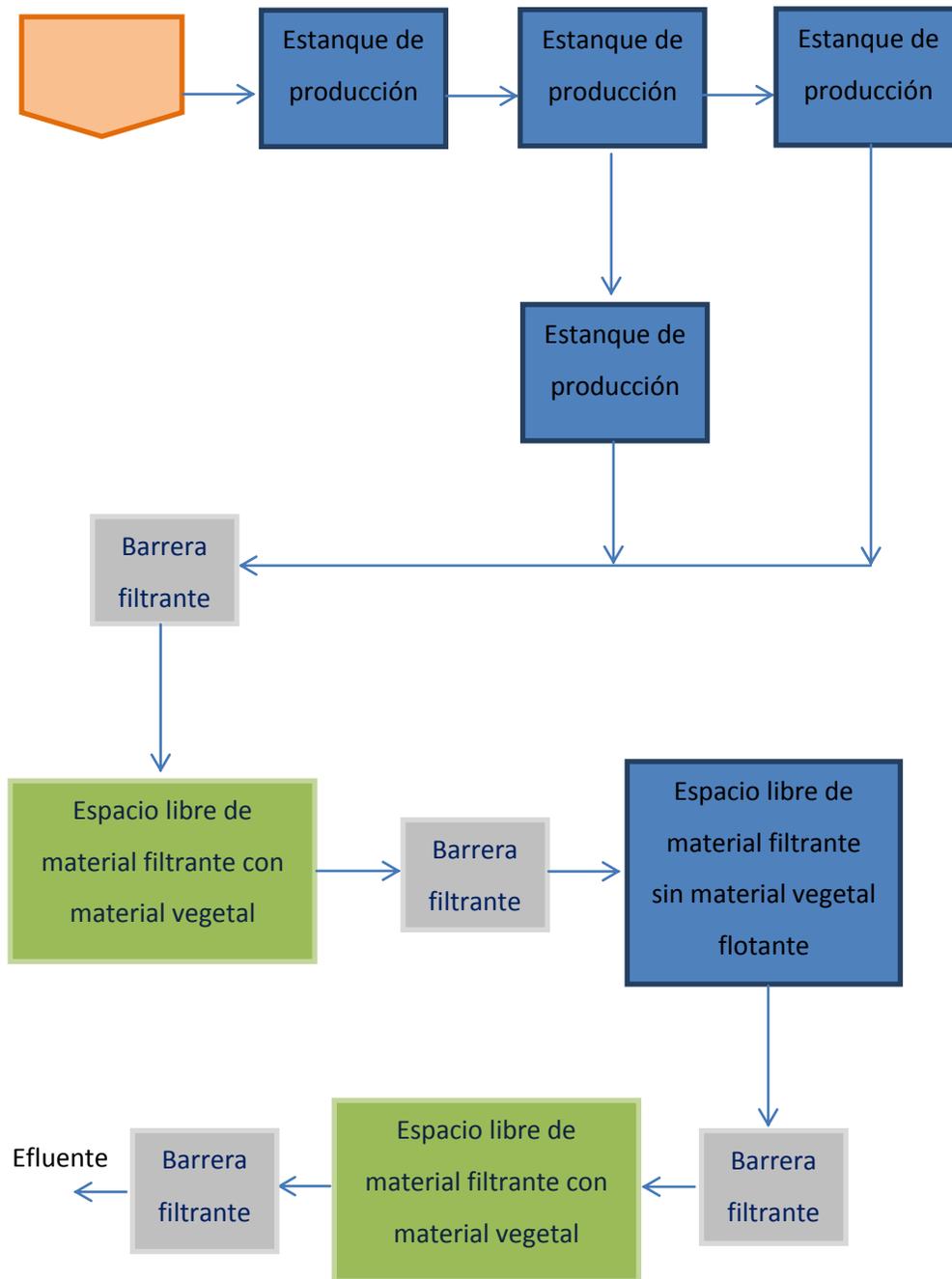


Figura26. Diagrama de flujo del tren de tratamiento para la tercera localidad del (Luna Pabello & Aburto Castañeda, 2010).

El tren de tratamiento mostrado en la Figura 26, pertenece a un diseño con una extensión total de 142m^2 , con el que se llevará el agua a cuatro estanques para la reproducción de *Ambystoma mexicanum*, aunque también pueden ser utilizados para la producción de alguna otra especie acuática que pueda ser consumida en la región.

Al igual que en la primera localidad, la construcción de este humedal artificial, tiene dos aportaciones importantes a la capacidad de carga de la región.

- a) El aumento de los terrenos productivos destinados a espacio acuático, se trata el agua suficiente para instalar cuatro estanques con una capacidad total de 100m^3 para la producción de especies acuáticas.
- b) El uso de vegetación flotante en el pre tratamiento del agua destinada a los estanques de producción, así como su uso en el post tratamiento del efluente del agua de dichos estanques contribuye al aumento de áreas de absorción de CO_2 generado por la producción de electricidad, con 40m^2 destinados a esta vegetación.

Al igual que en el caso de las dos primeras localidades, la vegetación flotante puede ser utilizada como forraje para animales que se crían en la región, aunque para esto es necesario conocer la cantidad de contaminantes que son capaces de absorber y el porcentaje de acumulación que podrían ocasionar en los animales de pastoreo; si después de hacer este análisis se decide utilizar como forraje, esto daría un aumento en los terrenos productivos destinados a "Terreno de pastos", las posibles terrenos productivos que se verán afectados, se muestran en la Tabla 17.

Tabla 17. Terreno productivo que se ve afectado con la construcción del humedal artificial diseñado para la tercera localidad.

	Terrenos productivos	Huella Ecológica por región [km²/año]	Capacidad de Carga Ecológica de la región [km²/año]	¿Afecta a la cantidad de terreno productivo?
Alimento	Espacio acuático	11,070.86	0.0	Si
Materia Prima	Superficie forestal	1,272.69	0.0	No
	Área de absorción	524.55	2.20	Si
Materia Prima	Campos de cultivo	747.05	4.83	No
Alimento	Terreno de pastos	30,027.64	7.62	No
Suelo	Territorio construido	45.38	25.75	No
Alimento	Campos de cultivo	8.25	77.23	No
	Σ Terrenos productivos	43,696.42	117.63	Si

6. Conclusiones

El análisis de la información bibliográfica de la zona lacustre de Xochimilco, fue posible estimar la huella ecológica de la zona de interés. Asimismo, mediante el análisis de los trabajos experimentales y teóricos desarrollados sobre el HAFC, permitió el desarrollo de nuevos humedales artificiales en la zona. Con la información generada, se desarrollo una metodología para cuantificar el aumento, de la capacidad de carga ecológica derivado de su construcción. Con base en lo anterior, se determinó que los humedales artificiales contribuyen en el aumento de la capacidad de carga ecológica en los sistemas ambientales, por lo que su implementación en la zona lacustre de Xochimilco, D.F. es deseable y de gran viabilidad.

Los humedales artificiales, como generadores de agua tratada contribuyen a la extensión de terrenos destinados a la crianza de especies acuáticas, por lo que se puede afirmar que son herramientas útiles para hacer de un terreno de la zona de estudio, una Unidad de Manejo para la Conservación de Vida Silvestre (UMA). En este contexto, los legítimos dueños de la tierra, son los precursores de la conservación y aprovechamiento de especies silvestres y endémicas de la zona lacustre, como es el caso del ajolote, *Ambystoma mexicanum*.

Bibliografía

- NOM-001-SEMARNAT-1996. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. (6 de enero de 1997). *Diario Oficial de la Federación*. Estados Unidos Mexicanos.
- NADF-002-RNAT-2002 Norma ambiental para el Distrito Federal que establece las condiciones para la agricultura ecológica en el suelo de conservación del Distrito Federal. (18 de diciembre de 2003). *Gaceta Oficial del Distrito Federal*. Distrito Federal, México.
- Ley General de Vida Silvestre. (30 de noviembre de 2010). *Diario Oficial de la Federación*. Estados Unidos Mexicanos.
- NOM-059-SEMARNAT-2010 Protección ambiental - Especies nativas de México de flora y fauna silvestres - Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio - Lista de especies en riesgo. (30 de diciembre de 2010). *Diario Oficial de la Federación*. Estados Unidos Mexicanos.
- Aburto Castañeda, S. (2011). *Tesis para obtener el grado de maestro en ciencias: Análisis y modelación del proceso de nitrificación en sistemas experimentales que simulan humedales artificiales*. México D.F.: Facultad de ciencias, UNAM.
- Beljansky, M. (6 de julio de 2010). *Conferencias de la escuela de negocios IAE*. Recuperado el 6 de julio de 2011, de Escuela de negocios IAE: <http://www.iae.org.ar>
- Bueno, G. E. (2011). Nuestra huella ecológica. *Boletín de la Procuraduría ambiental y del ordenamiento territorial del D. F. (PAOT)*.

- CIBAC. (2011). *wikimapia*. Recuperado el 18 de enero de 2012, de CIBAC-Centro de Investigaciones Biológicas y Acuícolas de Cuernavaca (Zona Metropolitana del Valle de México): <http://wikimapia.org>
- Clescerl; Greenberg; Eaton. (1989). *Standard methods for the examination of water and wastewater*.
- Clescerl; Greenberg; Eaton. (1999). *Standard methods for the examination of water and wastewater*.
- Comisión de Recursos Naturales de la Secretaría de Medio Ambiente. (2010). *El portal de Comisión de Recursos Naturales*. Recuperado el 17 de febrero de 2011, de <http://www.sma.df.gob.mx/corena/>
- Comisión Nacional del Agua. (2009). *Inventario nacional de plantas municipales de potabilización y de tratamiento de aguas residuales en operación*. México D.F.: Secretaría de medio ambiente y recursos naturales.
- Comisión Nacional del Agua. (2010). *Inventario nacional de plantas municipales de potabilización y tratamiento de aguas residuales en operación*. México, D.F.: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Comisión Nacional del Agua. (2011). *Estadísticas del agua en México*. México D.F.: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- CONAPESCA. (2010). *Comisión Nacional de Acuicultura y Pesca, México*. Recuperado el 1 de julio de 2011, de <http://www.conapesca.sagarpa.gob.mx>
- Departamento de pesca. (marzo de 1993). *Atlas de ubicación de productos agropecuarios utilizables en la planificación y desarrollo*

de la acuicultura en México. Pachuca: Organización de las Naciones Unidas para la agricultura y la alimentación (FAO).

Deschères, L. (4 de agosto de 2008). *El Blog de Luminotecnia*.

Recuperado el 26 de octubre de 2011, de Hay Luz:

<http://www.hayluz.com>

Flores Flores, M. (2010). *Trabajo para finalizar el Servicio Social: Guía de mantenimiento y operación del humedal artificial ubicado en el Centro de Investigaciones Biológicas y Acuícolas de Cuernavaca*. México D.F.: Facultad de química UNAM.

Gaitán Zamora, N. A. (2006). *Tesis para optar por el grado de maestra en ingeniería ambiental: Evaluación ecotoxicológica de 'composta' producida con residuos vegetales de humedales artificiales y lodos primarios a escala de laboratorio*. México D.F.: Facultad de Química UNAM.

Gallina Tessaro, S. A., Hernández Huerta, A., Delfín Alfonso, C. A., & González Gallina, A. (2009). Unidades para la conservación, manejo y aprovechamiento sustentable de la vida silvestre en México (UMA). Retos para su correcto funcionamiento. *Investigación ambiental*, 143-152.

García, L., Moreno, R., Ozaeta, A., Ruiz, A., Sacristán, D., Sánchez-Guevara, C., y otros. (3 de marzo de 2005). *La huella ecológica*. Recuperado el 18 de enero de 2012, de Ciudades para un futuro más sostenible: <http://habitat.aq.upm.es>

Garmendia, S. A., Salvador, A. A., Crespo, S. C., & Garmendia, S. L. (2006). *Evaluación de impacto ambiental*. Madrid: Pearson - Prentice Hall.

González González, J. T. (2011). *Proyecto terminal para obtener el título de Ingeniero Ambiental*. México D.F: Departamento de ciencias básicas e ingeniería, UAM Azcapotzalco.

INEGI. (2011). *Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI)*. Recuperado el 28 de julio de 2011, de Sitio del INEGI: <http://www.inegi.org.mx>

Jaramillo Henao, G., & Zapata Márquez, L. M. (2008). *Monografía para optar por el título de especialistas en gestión ambiental: Aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos en Colombia*. Antioquia: Facultad de Ingeniería, Posgrados de Ambiental, Universidad de Antioquia.

Kadlec, R. H., & Wallace, S. D. (2009). *Treatment Wetlands*. Boca Raton: CRC Press.

Luna Pabello, V. M., & Aburto Castañeda, S. (2010). *Proyecto: Selección de tecnologías para la depuración y manejo del agua con fines acuícolas en localidades propuestas por el CIBAC-UAM-X dentro de la zona lacustre de Xochimilco*. México D.F: Facultad de química, Laboratorio de microbiología experimental.

Luna Pabello, V. M., & Ramírez Carrillo, H. F. (2009). Humedales artificiales, una ecotecnología sustentable para la depuración de aguas residuales. *Anuario Latinoamericano de Educación Química*, 194.

Monza, J., & Márquez, A. (2004). *Fijación biológica de nitrógeno en la simbiosis rizobio - leguminosa*. Córdoba: Almuzara.

Ramírez Carrillo, H., Luna Pabello, V. M., Arredondo Figueroa, J. L., & Gallegos Martínez, M. E. (2009). Evaluación de un humedal

artificial de flujo vertical intermitente para obtener agua de buena calidad para la acuicultura. *Revista mexicana de ingeniería química*.

Ramírez Ruiz de Velasco, F. (15 de noviembre de 2007). Conservación, manejo y aprovechamiento sustentable de la vida silvestre. *Economía de la biodiversidad* (págs. 341-358). La Paz: Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, SEMARNAP.

Retes López, R., Cuevas González, M. I., Moreno Medina, S., Denogean Ballesteros, F. G., Ibarra Flores, F., & Martín Rivera, M. (2010). Unidad de manejo para la conservación de la vida silvestre como alternativa para "los nuevos agronegocios". *Revista Mexicana de Agronegocios XIV*, 336-346.

Rodriguez Monroy, J., & Durán de Bazúa, C. (2006). Remoción de nitrógeno en un sistema de tratamiento de aguas residuales usando humedales artificiales de flujo vertical a escala de banco. *Tecnol. Ciencia*, 25-33.

Romero Azuela, A. A. (2006). *Tesis para obtener el título de ingeniera química: Estrategia para la obtención de agua para riego agrícola en chinampas de Xochimilco empleando un humedal artificial*. México D.F.: Facultad de Química, UNAM.

Rosado Lozano, L. E. (2010). *Trabajo monográfico de actualización para obtener el título de ingeniera química: Modelos de remoción y transformación de compuestos nitrogenados en humedales artificiales de flujo subsuperficial: panorama actual y propuesta para generar nuevos modelos*. México D.F.: Facultad de química, UNAM.

- SAGARPA. (2010). *Coordinación General de Ganadería*. Recuperado el 30 de junio de 2011, de Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación:
<http://www.sagarpa.gob.mx>
- Sánchez García, H. (2009). *Tesis para obtener el título de ingeniero químico: Operación de un sistema experimental a bas ed e humedales artificiales para tratar agua procedente del canal de Cuemanco*. México D.F.: Facultad de química UNAM.
- Secretaría del medio ambiente del Distrito Federal. (s.f.). *El portal de la Secretaría de medio ambiente del Distrito Federal*. Recuperado el 18 de enero de 2012, de <http://www.sma.df.gob.mx>
- SEMARNAT. (2002). *Informe de la Situación del Medio Ambiente en México*. México D.F.: Compendio de Estadísticas Ambientales.
- SEMARNAT. (2008). *Informe de la Situación del Medio Ambiente en México*. México D.F.: Compendio de Estadísticas Ambientales.
- SEMARNAT. (2009). *Manejo de vida silvestre, manual técnico para beneficiarios*. México D.F.: Coordinación General de Educación y Desarrollo Tecnológico, Gerencia de Educación y Capacitación.
- SEMARNAT. (2010). *Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales*. Recuperado el 1º de agosto de 2011, de Antecedentes:
<http://www.semarnat.gob.mx>
- SIACON. (21 de septiembre de 2010). Sistema de Información Agroalimentaria de Consulta. México D.F, Mexico: Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación.

Bibliografía

Sreekumar, N. V., Narayana, B., Hegde, P., Manjunatha, B. R., & Sarojini, B. K. (2003). Determination of nitrite by simple diazotization method. *Microchemical Journal*, 27-32.

Stephan - Otto, E. (2006). *Xochimilco hoy: una realidad insustentable*. México D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México.

Apéndice A

En este Apéndice, se muestra como se calculó el consumo de la población de la Delegación Xochimilco, en diferentes categorías.

a) Carne y huevo

Con datos obtenidos de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA) en 2005:

Tipo de carne	Toneladas consumidas/año
De bovino	1'654,533
De porcino	1'629,253.5
De pollo	2'797,262.8
De ovino	85,965.2
De caprino	42,473.8
De pavo	200,998.8
Huevo para plato	2'003,668
Σ toneladas de carne y huevo	8'414,155.1

Se calculó el promedio de carne consumida por un habitante de los Estados Unidos Mexicanos, utilizando la cantidad de habitantes reportada por INEGI en 2010.

$$\frac{8'414,155.1 \text{ ton carne}}{112'336,538 \text{ habitantes} \cdot \text{año}} = \frac{0.074 \text{ ton carne}}{\text{habitante} \cdot \text{año}} \times \frac{1,000 \text{ kg}}{1 \text{ ton}} = \frac{74.9 \text{ kg}}{\text{habitante} \cdot \text{año}}$$

Y se calculó la cantidad de carne consumida en el sitio de estudio (delegación Xochimilco), que según el censo 2010 (INEGI, 2011), tiene una población de 415,007 habitantes.

$$\frac{74.9 \text{ kg}}{\text{habitante} \cdot \text{año}} \times 415,007 \text{ habitantes} = \frac{31'084,572.6 \text{ kg}}{\text{año}}$$

b) Leche

Con datos obtenidos de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA) en 2005:

Leche de bovino	117.2 l/hab·año
-----------------	-----------------

$$\frac{117.2 \text{ litros}}{\text{habitante} \cdot \text{año}} \times 415,007 \text{ habitantes} = \frac{48'638,820.4 \text{ litros}}{\text{año}}$$

c) Pescado

Con datos obtenidos de la Comisión Nacional de Acuacultura y Pesca (CONAPESCA) en 2009:

Volumen de producción pesquera	Toneladas consumidas por año
Consumo humano directo e indirecto	1'768,068

Se calculó el promedio de pescado consumido por un habitante de los Estados Unidos Mexicanos, utilizando la cantidad de habitantes reportada por INEGI en 2010.

$$\begin{aligned} \frac{1'768,068 \text{ ton de pescado}}{112'336,538 \text{ habitantes} \cdot \text{año}} &= \frac{0.01573 \text{ ton de pescado}}{\text{habitante} \cdot \text{año}} \times \frac{1,000 \text{ kg}}{1 \text{ ton}} \\ &= \frac{15.74 \text{ kg}}{\text{habitante} \cdot \text{año}} \end{aligned}$$

Y se calculó la cantidad de pescado, consumida en el sitio de estudio (delegación Xochimilco), que según el censo 2010 (INEGI, 2011), tiene una población de 415,007 habitantes.

$$\frac{15.74kg}{habitante \cdot año} \times 415,007 habitantes = \frac{6'531,807.1kg}{año}$$

d) Consumo de productos agrícolas

Con datos del Atlas de ubicación de productos agropecuarios utilizables en la planificación y desarrollo de la acuicultura en México.

Grupo	Suministro Nacional total [ton/año]
Cereales	29'859,309
Frutas	44'038,746
Σ	73'898,055

Se calculó el promedio de productos agrícolas, consumidos por un habitante de los Estados Unidos Mexicanos, utilizando la cantidad de habitantes reportada por INEGI en 2010.

$$\frac{73'898,055ton \text{ de prod. agrícolas}}{112'336,538 habitantes \cdot año} = \frac{0.66ton \text{ de prod. agrícolas}}{habitante \cdot año} \times \frac{1,000kg}{1ton}$$

$$= \frac{657.83kg}{habitante \cdot año}$$

Y se calculó la cantidad de productos agrícolas, consumidos en el sitio de estudio (delegación Xochimilco), que según el censo 2010 (INEGI, 2011), tiene una población de 415,007 habitantes.

$$\frac{657.83kg}{habitante \cdot año} \times 415,007 habitantes = \frac{273'002,984kg}{año}$$

e) Consumo de madera (INEGI, 2011)

$$\frac{9'704,530m^3}{112'336,538 \text{ habitantes} \cdot \text{año}} = \frac{0.086m^3}{\text{habitante} \cdot \text{año}}$$

$$\frac{0.086m^3}{\text{habitante} \cdot \text{año}} \times 415,007 \text{ habitantes} = \frac{35,851.63m^3}{\text{año}}$$

f) Energía

Volumen de las ventas de energía eléctrica en los Estados Unidos Mexicanos (INEGI, 2011): 177'484,872 Megawatt-hora (MWh)

$$\frac{177'484,872MWh}{112'336,538 \text{ habitantes} \cdot \text{año}} = \frac{1.58MWh}{\text{habitante} \cdot \text{año}}$$

$$\frac{1.58MWh}{\text{habitante} \cdot \text{año}} \times 415,007 \text{ habitantes} = \frac{655,685.72MWh}{\text{año}}$$

Apéndice B

Los índices de productividad, se calcularán utilizando la cantidad de alimento y energía que produce el país entre el terreno destinado para hacer estas actividades.

Estos cálculos se hacen con datos de SAGARPA, CONAPESCA, la Comisión Nacional del Agua e INEGI:

	Terrenos productivos [unidades de área]	[km²]	[Ton]	Índice de productividad [kg/km²]
Alimento	Espacio acuático	3'000,000	1'768,068	590
	Terreno de pastos ¹	274,269.49	7'283,012.62	2,655
	Campos de cultivo ²	Alimentos		33'106,300
Materia Prima	Campos de cultivo ²	Forrajes		44'211,200
	Superficie forestal	344,539.08	9'704,530m ³	28.17m ³ /km ²
Suelo	Territorio construido	12,633.97	28'607,568 casas ³	203,790.35 [s/u]
Área de absorción ⁴			1'000,000 kgCO ₂ /km ² (Deschères, 2008)	

1. Sólo se toma en cuenta la producción nacional, no se consideraron las importaciones.
2. Para los productos agrícolas, la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación, desarrolló un sistema de Información Geográfica, llamado SIACON, que permite

conocer el rendimiento de diferentes grupos agrícolas: Cereales, Especies medicinales, forrajes y frutales.

A continuación se muestra una tabla con los datos de rendimiento del 2009, de los diferentes grupos de interés para esta tesina:

Grupo	Rendimiento [ton/ha]	Rendimiento [kg/km²]
Cereales	58.821	5'882,100
Frutales	272.242	27'224,200
Alimentos	Cereales + Frutales	33'106,300
Forraje	442.112	44'211,200

3. Se consideró un promedio de 90km² de territorio construido por casa

[s/u]: sin unidades

4. Sumando las áreas de bosques y selvas

Terreno productivo	Área [km²]
Espacio acuático	$\frac{6'531,807.1kg}{año} \times \frac{km^2}{590kg} = \frac{11,070.86km^2}{año}$
Terreno de pastos	$\frac{79'723,393kg}{año} \times \frac{km^2}{2,655kg} = \frac{30,027.64km^2}{año}$
Campos de cultivo	Alimentos: $\frac{273'002,984kg}{año} \times \frac{km^2}{33'106,300kg} = \frac{8.25km^2}{año}$

	<p>Forrajes:</p> $\frac{33,027'812,760kg}{año} \times \frac{km^2}{44'211,200kg} = \frac{747.05km^2}{año}$
	<p>Materias primas:</p> $\frac{35,851.63m^3}{año} \times \frac{km^2}{28.17m^3} = \frac{1,272.69km^2}{año}$
<p>Territorio Construido</p>	$\frac{9'247,500km^2}{año} \times \frac{1}{203,790.35} = \frac{45.38km^2}{año}$
<p>Área de absorción</p>	$\frac{655,685.72MWh}{año} \times \frac{0.8ton CO_2}{MWh} = \frac{524,548.58ton CO_2}{año}$ $\frac{524,548.58ton CO_2}{año} \times \frac{1km^2}{1,000ton CO_2} = \frac{524.55km^2}{año}$

$\frac{0.8ton CO_2}{MWh}$ (Beljansky, 2010)