



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
POSGRADO EN CIENCIAS DE LA SOSTENIBILIDAD
CONTEXTOS URBANOS

Criterios de sostenibilidad en el manejo de cuerpos de agua urbanos. El valor del recurso hídrico artificial para la actividad económica de la zona lacustre de Xochimilco, Ciudad de México.

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA SOSTENIBILIDAD

PRESENTA:
ELIUD DE LA ROSA CAMACHO

Tutor principal
Mtro. Juan Ansberto Cruz Gerón
Instituto de Ingeniería - UNAM

Miembros del comité tutor
Dr. Daniel Alfredo Revollo Fernández
UAM - Azcapotzalco
Dr. Roberto Bonifaz Alfonzo
Instituto de Geofísica - UNAM

Ciudad Universitaria, Ciudad de México, noviembre 2018



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Coordinación de Estudios de Posgrado
Ciencias de la Sostenibilidad
Oficio: CEP/PCS/649/18
Asunto: Asignación de Jurado

Lic. Ivonne Ramírez Wence
Directora General de Administración Escolar
Universidad Nacional Autónoma de México
Presente

Me permito informar a usted, que el Comité Académico del Programa de Posgrado en Ciencias de la Sostenibilidad, en su trigésima novena sesión del 11 de septiembre del presente año, aprobó el jurado para la presentación del examen para obtener el grado de **MAESTRO EN CIENCIAS DE LA SOSTENIBILIDAD**, del alumno **DE LA ROSA CAMACHO ELIUD** con número de cuenta **303248110** con la tesis titulada "Criterios de sostenibilidad en el manejo de cuerpos de agua urbanos. El valor del recurso hídrico artificial para la actividad económica de la zona lacustre de Xochimilco, Ciudad de México", bajo la dirección del Mtro. Juan Ansberto Cruz Gerón.

PRESIDENTE:	DRA. MARISA MAZARI HIRIART
VOCAL:	MTRO. CARLOS MACKINLAY GROHMANN
SECRETARIO:	DR. DANIEL ALFREDO REVOLLO FERNÁNDEZ
SUPLENTE 1:	DR. ROBERTO BONIFAZ ALFONZO
SUPLENTE 2:	MTRO. JUAN ANSBERTO CRUZ GERÓN

Sin más por el momento me permito enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE,

"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Cd. Universitaria, Cd. Mx., 23 de noviembre de 2018.



Dra. Marisa Mazari Hiriart
Coordinadora
Posgrado en Ciencias de la Sostenibilidad, UNAM

Agradecimientos

A la Universidad Nacional Autónoma de México, por la educación otorgada a lo largo de mi trayectoria académica, así como la formación profesional y humana a lo largo de todos estos años.

De igual forma al Instituto de Ingeniería de la UNAM por darme cabida en sus instalaciones durante estos años de formación, así como al patrocinio otorgado para la elaboración de este trabajo.

A mi tutor y amigo, el Mtro. Juan Ansberto Cruz Gerón por todo el apoyo otorgado y darme la oportunidad de formar parte de su equipo de trabajo e investigación.

Al Dr. Óscar A. Fuentes Mariles por darme el respaldo y la libertad de desarrollar el presente documento.

A mi familia, en especial a mis padres Hilda y Eliud porque sin su esfuerzo, apoyo y formación no sería la persona que soy en el presente, muchas gracias.

A Yosahandi, gracias por creer en mí y motivarme a ser mejor persona, impulsándome y apoyándome en esta etapa de mi vida.

A mis profesores del Posgrado en Ciencias de la Sostenibilidad, por ampliar mi conocimiento y formación profesional, enriqueciendo mi formación como Urbanista.

También agradecer las asesorías y el tiempo otorgado por el Dr. Daniel Alfredo Revollo Fernández y el Dr. Roberto Bonifaz Alfonzo para la realización del presente documento.

Igualmente agradecer a la Dra. Marisa Mazari y al Mtro. Carlos Mackinlay por la disponibilidad y tiempo brindado, así como sus comentarios y recomendaciones que enriquecieron con su experiencia este documento.

A todos mis amigos y colegas, por su apoyo y amistad.

A todos y cada uno de los miembros que forman y han formado parte del Taller de Ingeniería y Diseño, en especial a Cristopher, Eduardo, Paola, Carolina y Alejandra.

Índice

Resumen	1
Abstract	2
Introducción	3
I. Planteamiento del problema.	4
II. Pregunta de investigación.	6
III. Objetivo del trabajo.	6
IV. Alcances del trabajo de investigación.	7
V. Justificación del tema de investigación.	7
VI. Hipótesis.	8
1. El sistema lacustre de Xochimilco, 1970 – 2017.	9
1.1 El sistema lacustre de Xochimilco. <i>Localización, delimitación de la zona de estudio y características climáticas principales.</i>	9
1.2 Estado actual del sistema lacustre de Xochimilco, año 2017. <i>Descripción de la fisiografía lacustre, zonificación de canales y cuerpos de agua.</i>	15
1.3 La importancia del agua residual tratada como principal recurso hídrico artificial del sistema lacustre. <i>Operación de las PTAR vinculadas al sistema lacustre.</i>	19
1.4 Evolución del sistema lacustre en función del recurso hídrico y escenario con tendencia a futuro. <i>Cambios de estado del sistema lacustre de Xochimilco.</i>	25
2. Economía del recurso hídrico artificial.	30
2.1 Valoración económica de servicios ecosistémicos.	30
2.2 El valor del recurso hídrico artificial para la zona lacustre de Xochimilco.	31
2.3 Estimación del valor económico del agua superficial para la actividad agrícola de la zona lacustre de Xochimilco bajo la metodología de costo de reemplazo.	33
2.3.1 Objetivo.....	33
2.3.2 Metodología de valoración de costo de reemplazo.	34
2.3.3 Aplicación de la metodología a la zona lacustre de Xochimilco.	35
2.3.4 Análisis de resultados.	47
2.4 Estimación del valor económico del agua superficial a partir de la actividad turística “Paseo en trajinera” presente en la zona de canales de Xochimilco. <i>Utilización de valoración directa del mercado de turismo en trajinera.</i>	49
2.4.1 Objetivo.....	51
2.4.2 Metodología de valoración directa.....	51

2.4.3 Aplicación de metodología a la actividad turística de paseo en trajinera.	51
2.3.4 Estimación del valor económico del ART para la actividad turística.	61
2.5 Comparativa del costo de operación y mantenimiento de las PTAR involucradas frente al valor económico estimado del ART.	62
3. Propuesta de indicador de sostenibilidad hídrica del sistema lacustre de Xochimilco en función de agua residual tratada.	66
3.1 Descripción del indicador de sostenibilidad hídrica para aplicación a la zona lacustre de Xochimilco.	66
3.2 Metodología de aplicación del indicador de sostenibilidad hídrica.	66
3.2.1 Interpretación del indicador.	68
3.3 Descripción de variables aplicadas a la zona lacustre de Xochimilco.	69
3.4 Aplicación del indicador del estado de sostenibilidad hídrica del sistema lacustre de Xochimilco.	75
3.5 Resultados del indicador de sostenibilidad hídrica del sistema lacustre de Xochimilco.	78
3.5.1 Resultados con volumen SACMEX (Q ART = 84,240 m ³ /día)	78
3.5.2 Resultados con volumen PUMA 2014 (Q ART = 17,255 m ³ /día)	81
3.5.3 Resultados con volumen potencial SACMEX (Q ART = 276,000 m ³ /día)	83
4. Discusión.	86
5. Conclusiones.	90
Referencias.	92

Índice figuras

Figura 1. Localización de la zona lacustre de Xochimilco.....	9
Figura 2. Representación digital de la cuenca endorreica de México y el sistema lagunar en el año 1519.	10
Figura 3. Delimitación de la zona de estudio.....	11
Figura 4. Estimación de canales y cuerpos de agua naturales de la poligonal de estudio	15
Figura 5. Modelo digital de alta resolución, tipo terreno	17
Figura 6. Subdivisión de la poligonal de estudio en función de las estructuras de control y elevación media	18
Figura 7. Localización de las PTAR y red de distribución a la zona lacustre de Xochimilco.....	20
Figura 8. Localización de puntos de suministro de ART a la zona lacustre de Xochimilco	22
Figura 9. Cuencas de atracción generadas por el estado de las variables y su influencia en los estados de equilibrio del ecosistema	26
Figura 10. Cambios de estado del sistema lacustre de Xochimilco.....	28
Figura 11. Propuesta de estimación del valor económico del agua residual tratada en función de las principales actividades económicas en la zona lacustre.....	32
Figura 12. Chinampa tipo, interrelación de vivienda con invernaderos en la zona de Producción Rural Agroindustrial	36
Figura 13. Estimación de superficie chinampera ocupada por invernaderos de manera puntual....	37
Figura 14. Estimación de superficie chinampera ocupada por invernaderos de manera zonal.....	38
Figura 15. Curva generalizada de la variación del coeficiente de cultivo a lo largo del desarrollo de la planta	42
Figura 16. Ubicación de los 10 embarcaderos localizados en la zona lacustre de Xochimilco.....	52
Figura 17. Encuesta tipo para aplicación a los prestadores de servicios turísticos.....	53
Figura 18. Resultados de la estimación del valor económico del agua residual tratada en función de las actividades económicas representativas en la zona lacustre	64
Figura 19. Categorías establecidas para el mapeo de los resultados en la zona lacustre de Xochimilco.....	69
Figura 20. Identificación de los aportes de ARC a la zona lacustre de Xochimilco.....	71
Figura 21. Simplificación de funcionamiento del sistema lacustre de Xochimilco, con ingreso de ART reportado por SACMEX 2014 y ARC estimada.....	73
Figura 22. Esquema con variables simplificadas contenidas en el Modelo Vensim para estimación de tiempo de residencia del agua	75
Figura 23. Interrelación de las variables. Descripción de funcionamiento, Modelo Vensim	77
Figura 24. Mapeo de resultados en condiciones naturales, calculado con gastos de entrada reportados por SACMEX.....	79
Figura 25. Mapeo de resultados en condiciones naturales más consumo agrícola, calculado con gastos de entrada reportados por SACMEX	80

Figura 26. Mapeo de resultados en condiciones naturales más consumo agrícola y descargas clandestinas, calculado con gastos de entrada reportados por SACMEX	80
Figura 27. Mapeo de resultados en condiciones naturales, calculado con gastos de entrada reportados por PUMA 2014	82
Figura 28. Mapeo de resultados en condiciones naturales más consumo agrícola, calculado con gastos de entrada reportados por PUMA 2014.....	82
Figura 29. Mapeo de resultados en condiciones naturales más consumo agrícola y descargas clandestinas, calculado con gastos de entrada reportados por PUMA 2014	83
Figura 30. Mapeo de resultados en condiciones naturales, calculado con gastos de operar las PTAR a capacidad de diseño	84
Figura 31. Mapeo de resultados en condiciones naturales más consumo agrícola, calculado con gastos de operar las PTAR a capacidad de diseño	84
Figura 32. Mapeo de resultados en condiciones naturales más consumo agrícola y descargas clandestinas, calculado con gastos de operar las PTAR a capacidad de diseño.....	85
Figura 33. Estados del sistema lacustre artificial de Xochimilco, elaborado con resultados de valoración económica del recurso hídrico artificial e indicador de sostenibilidad hídrica	86
Figura 34. Cárcamo de Dolores, Chapultepec Ciudad de México.	89

Índice tablas

Tabla 1. Superficies de agua presente por zona (m ²)	19
Tabla 2. Capacidad de tratamiento de agua residual	20
Tabla 3. Caudales de suministro de ART. Datos de SACMEX 2014 contrastados con caudales PUMA 2014	23
Tabla 4. Incremento potencial en los gastos de entra de ART, tomando como referencia los gastos reportados por SACMEX 2014, e incrementados a la capacidad total instalada de las PTAR.....	24
Tabla 5. Resultados de la estimación de superficie chinampera ocupada por invernaderos	39
Tabla 6. Superficie sembrada por cultivos reportados en el Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera 2010 - 2015.	41
Tabla 7. Coeficientes de cultivo (Kcmed) para flores y plantas pequeñas	44
Tabla 8. Uso consultivo mensual para flores y plantas pequeñas. Método de Blaney-Criddle	44
Tabla 9. Uso consultivo bimestral. Método de Blaney-Criddle.....	45
Tabla 10. Tarifa por el suministro de agua potable en red sin subsidio	46
Tabla 11. Tarifa por el suministro de agua potable en camión cisterna, suministro de agua residual tratada de nivel secundario y terciario.....	47
Tabla 12. Estimación de costo bimestral por consumo de agua de fuentes alternas para riego en invernaderos.	48
Tabla 13. Porcentaje por el pago de fuentes alternas del valor total de la producción de plantas en Xochimilco.....	49
Tabla 14. Número de trajineras por embarcadero. Repartición proporcional de las 50 encuestas muestra	55
Tabla 15. Distribución de la afluencia de turistas en una semana tipo	56
Tabla 16. Estimación de ingreso bruto mensual promedio calculado con tarifa de \$350/hr vigente al mes de junio 2017.	58
Tabla 17. Estimación de ingreso neto mensual promedio calculado con tarifa de \$350/hr vigente al mes de junio 2017	60
Tabla 18. Costo total de operación de las PTAR Cerro de la Estrella, San Luis Tlaxialtemalco y San Lorenzo. Año 2016	62
Tabla 19. Costo estimado de operación de las PTAR Cerro de la Estrella, San Luis Tlaxialtemalco y San Lorenzo, de 50% a 100% de su capacidad de diseño	63
Tabla 20. Volumen de control estimado para cada una de las siete plataformas de agua que componen el sistema lacustre de Xochimilco	70
Tabla 21. Volumen estimado de ARC que ingresa al sistema lacustre de Xochimilco	72
Tabla 22. Volúmenes estimados de ART que ingresan al sistema lacustre de Xochimilco.	72
Tabla 23. Estimación en el consumo de agua para riego agrícola	74
Tabla 24. Volumen estimado de evaporación diaria durante el mes de mayo.....	74
Tabla 25. Tiempo de residencia del agua. Sustitución del volumen de control (CV), durante el mes de mayo. Calculado con gastos de entrada reportados por SACMEX 2014.....	79

Tabla 26. Tiempo de residencia del agua. Sustitución del volumen de control (CV), durante el mes de mayo. Calculado con gastos de entrada reportados por PUMA 2014.	81
Tabla 27. Tiempo de residencia del agua. Sustitución del volumen de control (CV), durante el mes de mayo. Calculado con gastos de operar las PTAR al 100 % de capacidad de diseño.....	83

Índice gráficas

Gráfica 1. Temperaturas promedio mensuales en la zona de estudio	13
Gráfica 2. Distribución de la precipitación anual.....	13
Gráfica 3. Relación de precipitación, temperatura y evaporación anual.....	14
Gráfica 4. Distribución del ART	21
Gráfica 5. Valor de la producción de plantas en Xochimilco	40
Gráfica 6. Comportamiento de la afluencia de turistas a lo largo del año.....	56
Gráfica 7. Estimación de ingreso bruto mensual calculado con tarifa de \$350/hr vigente al mes de junio 2017	59

Resumen

En la actualidad el Agua Residual Tratada se ha convertido en el insumo principal para el ecosistema lacustre de Xochimilco y, al mismo tiempo, de las actividades dependientes de éste como son la agricultura y el turismo. Dicho recurso proviene principalmente de tres Plantas de Tratamiento de Agua Residual, destacándose la PTAR Cerro de la Estrella como la de mayor aportación. Sin embargo dichas infraestructuras operan por debajo de su capacidad de diseño comprometiendo los volúmenes de ART entregados a la zona, implicando una menor renovación del agua del sistema lacustre, afectando a las actividades económicas relacionadas con el agua. En el presente documento se desarrolla una metodología para estimar el valor económico del ART en comparación con los costos de operación de las PTARs, obteniendo de esto una relación costo beneficio positiva. Subsecuentemente se desarrolla un indicador de sostenibilidad hídrica aplicado al sistema lacustre, que toma como variable principal los aportes de ART reportados por instituciones oficiales y académicas. Los resultados dejan de manifiesto que bajo condiciones de estrés hídrico, dichos aportes resultan ser insuficientes para garantizar un estado favorable del sistema. Como conclusión, se obtuvo que es importante incrementar los volúmenes de ART que se entregan a la zona lacustre de Xochimilco para garantizar la permanencia de los servicios ambientales generados y mantener los beneficios económicos, sociales y culturales para presentes y futuras generaciones.

Palabras clave: zona lacustre de Xochimilco, sistema lacustre de Xochimilco, planta de tratamiento de agua residual Cerro de la Estrella, valor económico del agua residual tratada.

Abstract

Now a days, treated wastewater has become the main input for the lake ecosystem of Xochimilco and, the activities dependent on it such as agriculture and tourism. This resource comes mainly from three Wastewater Treatment Plants, stand out the Cerro de la Estrella PTAR as the highest contribution. However, these infrastructures operate below their design capacity, compromising the volumes of ART delivered to the area, implying a lower renewal of water in the lacustrine system, affecting the economic activities related to water. In this document, a methodology is developed to estimate the economic value of the ART in comparison with the operating costs of the PTARs, obtaining from this a positive cost-benefit relation. Subsequently, an indicator of water sustainability applied to the lacustrine system is developed, which takes as a main variable the contributions of ART reported by official and academic institutions. The results show that under conditions of water stress, these contributions turn out to be insufficient to guarantee a favorable state of the system. As a conclusion it was obtained that it is important to increase the volumes of ART that are delivered to the lacustrine zone of Xochimilco to guarantee the permanence of the generated environmental services and maintain the economic, social and cultural benefits for present and future generations.

Key words: Xochimilco lake zone, Xochimilco lake system, Cerro de la Estrella wastewater treatment plant, economic value of treated wastewater.

Introducción

La zona lacustre de Xochimilco localizada al sureste de la Ciudad de México, en el extremo norte de la Delegación Xochimilco, se encuentra inmersa dentro de la mancha urbana. Es colindante con las Delegaciones Iztapalapa, Milpa Alta, Tláhuac y Tlalpan. Cuenta con una superficie aproximada de 3,313 hectáreas (ha). Extensión que en su mayoría alberga actividades relacionadas con el agua, como son la conservación ecológica, la producción agrícola en chinampas, así como equipamientos de carácter turístico, educativo y recreativo de alcance local y regional. Asimismo la presencia de asentamientos humanos de origen informal acompañados de descargas clandestinas de agua residual.

Sin embargo, a pesar de tratarse de un ecosistema lacustre de origen natural, a partir de la década de 1970 ya no cuenta con sus afloramientos naturales de agua, dependiendo de los aportes de agua residual tratada durante gran parte del año. Esto lleva al sitio a un estado de vulnerabilidad hídrica, dado que depende del correcto funcionamiento de las plantas de tratamiento de agua residual para subsistir en temporada de estiaje.

Por lo antes expuesto, el presente documento tiene el objetivo de establecer un criterio de sostenibilidad aplicable al manejo de cuerpos de agua urbanos, que relacione la importancia del ART en cantidad con el estado que guarda el sistema lacustre de Xochimilco, y la implicación que esto conlleva para las actividades económicas agrícolas y turísticas que en ella se desarrollan.

Para lograrlo, el documento está estructurado en tres capítulos, el primero de ellos busca explicar el funcionamiento hídrico del sistema lacustre y la relación existente con las plantas de tratamiento de agua residual. En el segundo capítulo se plantean y aplican dos metodologías orientadas a estimar el valor económico del agua residual tratada, como un recurso hídrico artificial; valor que al final del capítulo es comparado con los costos asociados a la operación y mantenimiento de las plantas de tratamiento de agua residual encargadas de proveer dicho recurso. Finalmente en el tercer capítulo se presenta un indicador de sostenibilidad hídrica, con el cual se evalúa el estado del sistema lacustre en función de los ingresos de agua residual tratada, reportados y medidos por instituciones oficiales y académicas.

Con el desarrollo de estos tres capítulos, se busca establecer la importancia del agua residual tratada para la zona lacustre, desde un aspecto económico y social, así como servir de referente para la elaboración de políticas públicas que busquen la preservación de la zona. Asimismo busca generar un cambio en la percepción que se tiene sobre los presupuestos destinados al tratamiento de agua residual, por una visión integral en la que se involucra el mantenimiento tanto del ecosistema natural, como de todas aquellas actividades económicas y sociales derivadas de la permanencia del recurso hídrico y de la zona.

I. Planteamiento del problema.

Uno de los principales problemas que enfrenta la zona lacustre de Xochimilco se relaciona con el manejo, la disponibilidad y la calidad del recurso hídrico, ya que en la actualidad, el sitio no cuenta con los aportes originales de agua subterránea. La razón se debe a que sus manantiales y escurrimientos naturales fueron entubados para dotar de agua limpia a los habitantes de la Ciudad de México, principalmente a la población de la Delegación Xochimilco. Esta situación generó, en la década de los años 70 del siglo pasado, el descenso abrupto en el nivel de canales y cuerpos de agua, por lo que fue necesaria la construcción de Plantas de Tratamiento de Agua Residual (PTAR), para suplir las fuentes naturales con Agua Residual Tratada (ART) y de esta forma mantener la zona y con ello la vocación lacustre (CORENA, 2011).

En este sentido, el Sistema de Agua de la Ciudad de México (SACMEX) reporta que provee un gasto de continuo de 876 litros de ART por segundo a la zona lacustre (PUMA, 2014), volumen que parece ser insuficiente dadas las problemáticas que presenta actualmente. Algunas de estas son: el descenso gradual en el nivel de agua de canales durante los meses de estiaje, problemas de eutrofización que se presenta en canales y cuerpos de agua, la presencia de canales y apantles secos o innavegables y la falta de agua para riego en algunas zonas de chinampas.

Asimismo, este ecosistema es el soporte de actividades económicas como la agricultura y el turismo. Por lo que, la desaparición del recurso hídrico, de origen natural o artificial, implica también la desaparición de ecosistemas naturales, la pérdida de empleos en la región y la transformación completa del sitio. A una escala regional, la pérdida de la vocación lacustre

de la zona conlleva la desaparición de servicios ambientales que el sitio presta actualmente a la Ciudad de México, como lo es la regulación climática y la humedad atmosférica.

Actualmente, y con este escenario de preámbulo, no existe un registro de medición para dicho fenómeno, específicamente para comprobar que, la alteración del sistema lacustre implica una afectación al sistema social, en el caso particular a las actividades económicas representativas del lugar; la agricultura y el turismo.

Acorde con el Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), en 2015, la producción de plantas de ornato, una de las actividades agrícolas de la zona representó un valor de 243 millones de pesos; mientras que datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) reportan que, para el año 2014, la venta de plantas de ornato presentó una producción bruta total de 165 millones; generado cerca de 3,700 empleos directos. Asimismo, en la zona de canales, se registran un total de 1,005 trajineras censadas, distribuidas en diez embarcaderos, empleando cerca de 1,000 personas, por lo que se estima que la derrama económica de esta actividad asciende de los 220 a 440 millones de pesos anuales, cifras estimadas en este trabajo.

En este contexto, la calidad del sistema lacustre así como su permanencia en el tiempo es sensible a la acción o no acción de los tomadores de decisión, y, en concreto, del interés en conservar, mantener y operar las plantas de tratamiento de agua residual así como su red de distribución.

Aunado a lo anterior, es importante reconocer que el sitio se encuentra inmerso en la mancha urbana de la Ciudad de México, urbe que se ha desarrollado a partir de la desecación de los grandes lagos de la cuenca de México, con obras de infraestructura que buscan eliminar su vocación lacustre (CONAGUA, 2015). Esta situación pone al sitio en riesgo de ser desecado y urbanizado, sustituyendo suelos agrícolas y de conservación por urbanizaciones informales, con una población que requerirá servicios en un futuro.

II. Pregunta de investigación.

Considerando al ART, como único recurso hídrico en temporada de estiaje, ¿hasta qué punto la disponibilidad este recurso hídrico en temporada de secas, afecta a la sostenibilidad del sistema lacustre de Xochimilco?

Y por consecuencia ¿en qué grado esta condición afecta a las actividades económicas, agricultura y turismo, que dependen de la existencia y calidad del sistema lacustre?

III. Objetivo del trabajo.

El presente documento tiene por objetivo establecer un criterio de sostenibilidad aplicable al manejo de cuerpos de agua urbanos, que relacione la importancia del ART en cantidad con el estado que guarda el sistema lacustre de Xochimilco, y la implicación que esto conlleva para las actividades económicas agrícolas y turísticas que en ella se desarrolla. Cabe aclarar que el criterio propuesto no busca estudiar variables físico-químicas (calidad) del ART, dado que se requieren conocimientos profundos en el tema así como del muestreo y medición de los componentes.

Para lograr este objetivo se busca en primer lugar conocer el valor económico que representa en la actualidad el ART que ingresa al sistema lacustre, en función de las actividades económicas dependientes, como la agricultura y el turismo (recorrido turístico en trajinera). Valores que serán contrastados con los gastos de operación y mantenimiento de las plantas de tratamiento de agua residual en una relación costo beneficio.

Conociendo la importancia económica del ART, relacionar el volumen de ésta con el estado que presenta la zona lacustre. Estableciendo parámetros para justificar un aumento en las capacidades de operación de las PTAR incrementando con ello la disponibilidad del recurso hídrico.

Objetivos particulares.

1. Conocer el funcionamiento actual del sistema lacustre de Xochimilco, acotado a las variables urbanas y de funcionamiento hidrológico de la zona.

2. Conocer el valor económico del recurso hídrico artificial (ART) presente en la zona lacustre de Xochimilco, y establecer un referente económico de la importancia de mantener y operar correctamente las PTAR.
3. Proponer y aplicar a la zona lacustre de Xochimilco una evaluación de sistemas lacustres artificiales, que relacione los volúmenes entregados de agua residual tratada con las condiciones presentes en la zona.
4. Evaluar si el volumen de ART que ingresa a la zona es adecuado para mantener la vocación lacustre, o en su defecto conocer si el sistema corre riesgo de transformarse, afectando a las actividades económicas relacionadas (agricultura y turismo).

IV. Alcances del trabajo de investigación.

El presente trabajo plantea realizar y aplicar una propuesta de evaluación del sistema lacustre de Xochimilco, en función de la disponibilidad de agua residual tratada y estimar el valor económico de dicho recurso en relación a las actividades económicas dependientes de ella, como son la agricultura y el turismo. Asimismo, realizar un análisis costo beneficio entre los costos de operación de las PTAR y los beneficios económicos que genera, sumado a los estados que presenta el sistema lacustre en función de los aportes de ART.

V. Justificación del tema de investigación.

En la actualidad el agua residual tratada se ha convertido en el insumo principal para el ecosistema lacustre de Xochimilco. Del aporte de ART, depende la continuidad de los servicios ambientales que genera el sitio junto con el sostenimiento de las actividades agrícolas y turísticas. Desafortunadamente la PTAR Cerro de la Estrella, la más importante de la región, presenta problemas de operación por déficit presupuestal (Riveros, 2013). En este sentido, los gastos de operación y mantenimiento que involucran las PTAR son vistos como un gasto, y no como una inversión necesaria para mantener y generar riqueza ambiental, cultural, social y económica, ya sea por omisión o por desconocimiento de estos beneficios.

Asimismo, es importante realizar un balance hídrico tomando como variable principal el volumen de ART y el estado que guarda el sistema lacustre. Se considera que el volumen de

ART entregado a Xochimilco es insuficiente, pero no se conocen las consecuencias que esto conlleva y cómo altera el estado del sistema. De manera complementaria, conocer si elevar los volúmenes de operación actuales a la capacidad de diseño de las PTAR puede generar un cambio favorable en la zona lacustre.

Es necesario revertir el paradigma sobre las PTAR, para ser vistas como una inversión pública enfocada a mantener las condiciones medioambientales de la zona lacustre y a la economía de la región, sin la cual, se perderían fuentes de empleo locales. Sin olvidar que se trata de una estrategia para preservar los servicios ambientales y controlar la expansión de la mancha urbana.

VI. Hipótesis.

Conociendo la relación existente entre la dotación de agua residual tratada y el estado que guarda el sistema lacustre de Xochimilco, junto con las implicaciones económicas que esto conlleva, será posible justificar las políticas en materia de agua residual enfocadas a incrementar la cantidad de ART destinada al sistema lacustre, mejorando la calidad del mismo y aportando beneficios ambientales y económicos en el presente y futuro.

1. El sistema lacustre de Xochimilco, 1970 – 2017.

1.1 El sistema lacustre de Xochimilco. *Localización, delimitación de la zona de estudio y características climáticas principales.*

El sitio de estudio, denominado zona lacustre de Xochimilco, se localiza al sureste de la mancha urbana de la Ciudad de México, en el extremo norte de la Delegación Xochimilco colindante con las Delegaciones de Iztapalapa, Milpa Alta, Tláhuac y Tlalpan (Figura 1). Delimita al norte con vialidades como el Anillo Periférico Sur, Av. Canal Nacional, Av. Canal de Chalco y Av. Muyuguarda; mientras que en la zona sur colinda con una frontera denominada como porosa, compuesta de barrios y pueblos pertenecientes a la Delegación Xochimilco (CORENA, 2011).

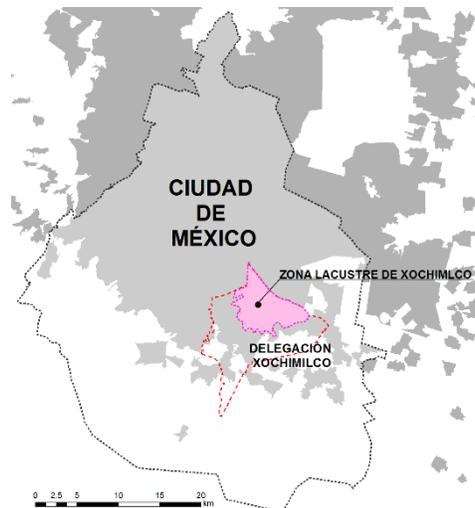


Figura 1. Localización de la zona lacustre de Xochimilco. *Elaboración propia.*

Su origen se remonta al periodo de la formación de la cuenca endorreica de México, a consecuencia de la erupción y posterior formación volcánica *Ajusco – Chichinautzin*, hace 700 mil años, en lo que es hoy la región fisiográfica *Lagos y Volcanes del Anáhuac* (CORENA, 2011). Originalmente dicha cuenca drenaba sus aguas en dirección sur, hacia la cuenca del Río Balsas en el estado de Morelos. La formación de los grandes lagos se dio gracias al aporte de agua de origen glacial durante el periodo de tiempo conocido como Cuaternario Superior. La zona de estudio formaba parte de un sistema lagunar compuesto por

cinco grandes lagos conocidos como: el Lago de México, el Lago de Zumpango, el Lago de Texcoco, el Lago de Chalco y el Lago de Xochimilco (Figura 2) (CORENA, 2011).



Figura 2. Representación digital de la cuenca endorreica de México y el sistema lagunar en el año 1519. Tomada el 15 de noviembre del 2016 del sitio: <http://gregsandor.tripod.com/Mx.htm>

Dada la riqueza natural y cultural que aún perdura, este sitio es un elemento de interés para múltiples organismos nacionales e internacionales que procuran la conservación. En el año 1987, fue declarado como Sitio de Valor Patrimonio Mundial Cultural y Natural por la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO). El 2 de febrero del año 2004, la Convención Relativa a los Humedales de Importancia Internacional especialmente como Hábitat de Aves Acuáticas, conocido como Convenio de RAMSAR, la incluyó a la lista de humedales de importancia internacional RAMSAR, con el nombre *Sistema Lacustre Ejidos de Xochimilco y San Gregorio Atlapulco*. Asimismo, dentro de las regulaciones en materia de suelo de carácter federal, el sitio cuenta con declaratoria de Área Natural Protegida desde el año 1992 por el entonces presidente de los Estados Unidos Mexicanos Carlos Salinas de Gortari (Diario Oficial de la Federación (DOF), 1992).

Delimitación de la zona de estudio.

La poligonal de estudio se delimitó utilizando criterios urbano-espaciales. En la zona norte delimita con vialidades principales como: Av. Canal de Chalco, Av. Canal Nacional, Av. Muyeguarda y el Anillo Periférico Adolfo Ruíz Cortines. Esta condición de colindar con vialidades principales genera una frontera rígida de aproximadamente 15.6 km de longitud, que ayuda a contener la expansión de la mancha urbana y la aparición de asentamientos humanos (Figura 3).

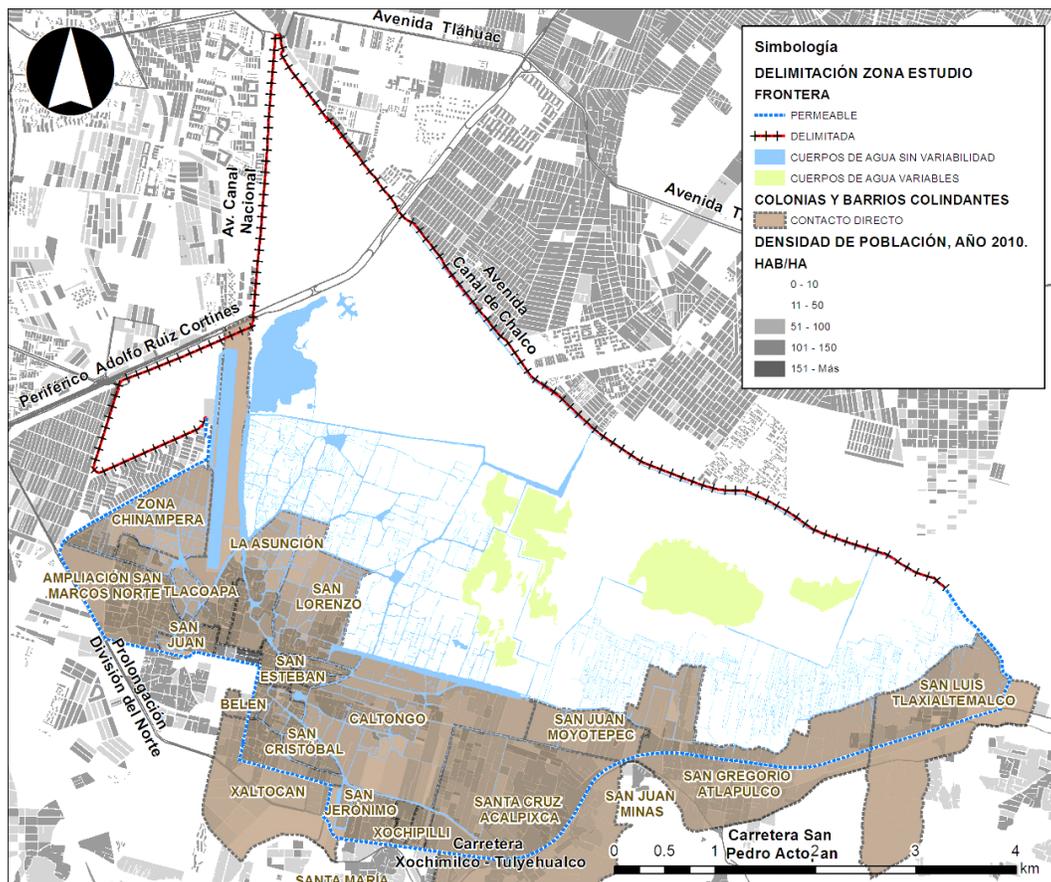


Figura 3. Delimitación de la zona de estudio. Elaboración propia con base de INEGI, censo año 2010.

Por el contrario en la zona sur y suroccidental no es posible establecer un límite claro entre la zona lacustre y la urbanización, por lo que la frontera se comporta como una envolvente permeable. Infortunadamente, la mancha urbana incide con usos habitacionales sobre las chinampas agrícolas, donde la frontera permeable tiene una longitud de aproximadamente 15.9 km que transcurre entre lo urbano y lo natural (Figura 4). Para establecer la frontera sur

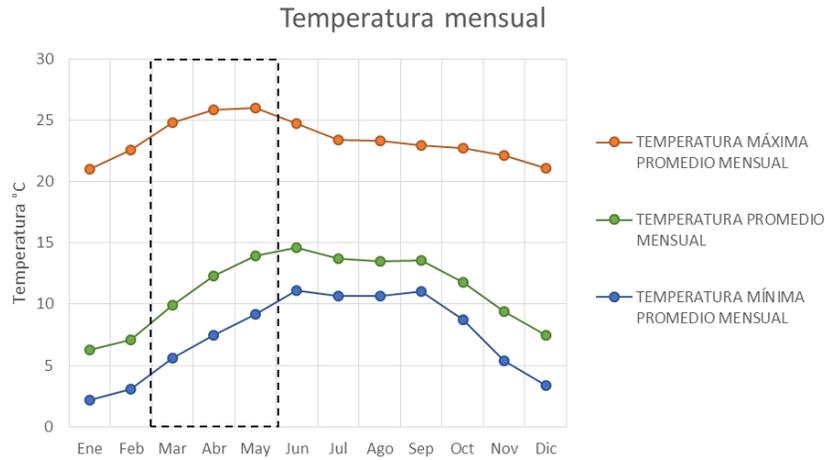
fueron incluidos los barrios y colonias que colindan con canales y apantles (Cartografía urbana INEGI, Censo de Población y Vivienda 2010).

La poligonal de estudio colinda con 72 colonias y barrios pertenecientes a las Delegaciones Coyoacán, Iztapalapa, Tláhuac y Xochimilco, en las que habitaban aproximadamente 396,369 personas al año 2010. De estos asentamientos 36 no tienen un vínculo directo con el sitio, y sus 242,583 habitantes no pueden acceder al espacio de manera directa. Por el contrario se tienen identificadas 36 colonias y barrios, localizados en la Delegación Xochimilco, en los que sus cerca de 122,425 habitantes interactúan directamente con la zona lacustre. De este total casi 84,156 personas habitaban sobre antiguas zonas chinamperas rodeados de canales (Cartografía urbana INEGI, Censo de Población y Vivienda 2010).

Condiciones climáticas del sitio. *Determinación de la condición de estrés hídrico.*

Es importante describir y conocer las condiciones climáticas para poder comprender la importancia que conlleva los aportes de ART para la subsistencia de la zona lacustre en la actualidad. Actualmente, experimenta condiciones que denominaremos *estrés hídrico* gran parte del año, durante los meses de estiaje o baja presencia de lluvias, en los cuales las PTAR y sus aportes de ART constituyen la principal fuente de agua para mantener canales y cuerpos de agua. Asimismo, como se verá a continuación, la temperatura juega un papel importante en la evapotranspiración y en la importancia del mantenimiento de servicios de regulación climática que la zona lacustre presta a la zona sur de la Ciudad de México.

La altura promedio del sitio se ubica en los 2,232 metros sobre el nivel del mar. El clima es catalogado como templado subhúmedo (C_w), con una temperatura media anual que ronda los 12°C a 18°C. Las temperaturas máximas se registran en los meses de abril y mayo, alcanzando los 26°C promedio (Gráfica 1). En contraste, para los mismos meses las temperaturas máximas obtenidas en estaciones climáticas ubicadas en el centro de la Ciudad de México se ubican por encima de los 28°C, como el caso de las estaciones Iztacalco con 28.2 °C y la estación Col. Moctezuma, con un promedio de máximas de 29.3 °C. Fuente: Extractor Rápido de Información Climatológica (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), 2006).



Gráfica 1. Temperaturas promedio mensuales en la zona de estudio, elaboración propia con datos de la estación climatológica Muyuguarda.

La precipitación en la región se encuentra en los 797.2 mm de agua anuales, o 797 litros por metro cuadrado de superficie. Cabe resaltar que la distribución de la precipitación no es homogénea a lo largo del año, con dos periodos claramente diferenciados entre sí. Un periodo de seis meses (mayo – octubre), en los que se concentra aproximadamente el 90% de la precipitación anual, que contrasta con un periodo de seis meses de bajas precipitaciones (noviembre – abril), los cuales en conjunto acumulan el restante 10% de la precipitación anual (Gráfica 2) (Estación Climatológica de Muyuguarda, Xochimilco (IMTA, 2006) del año 1921 a 1988).

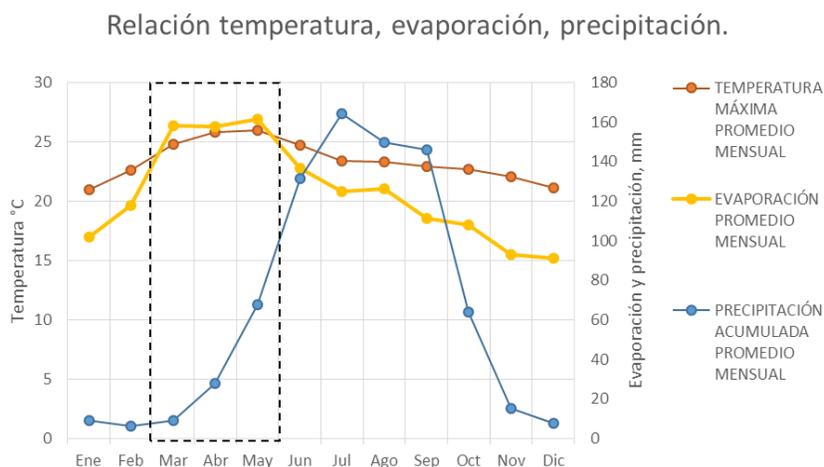


Gráfica 2. Distribución de la precipitación anual, elaboración propia con datos de la Estación Climatológica Muyuguarda, (fuente ERIC 2005, del año 1921 a 1988).

Continuando con datos de la Estación Climatológica Muyuguarda, se registra una evaporación potencial media anual de 1,489 mm de agua, medido en tanque de evaporación.

La evaporación promedio mensual se ubica en los 124 mm/mes, mientras que los niveles de máxima evaporación se registran en los meses de marzo, abril y mayo, con valores de 158 mm, 157.9 mm y 161 mm respectivamente. Es importante aclarar que, si bien la evaporación potencial es cercana al 200% superior a los valores de precipitación, ésta hace referencia únicamente a los cuerpos de agua. Asimismo, a los valores de evaporación potencial, se les aplica un coeficiente de reducción K (Coeficiente K URSS GGI es de 0.80, mientras que el coeficiente K Clase A de EEUU es de 0.70) para calcular el volumen evaporado final (Sokolov & Chapman, 1981).

En la Gráfica 3 se relacionan los valores medios mensuales referentes a temperatura, precipitación y evaporación potencial. Con el cruce de dicha información, se observa que durante los meses de marzo, abril y mayo, el sistema lacustre experimenta las condiciones que serán denominadas como *estrés hídrico*, caracterizado por una baja precipitación acompañada de altas temperaturas y alta evaporación potencial. Debido a las mayores temperaturas el consumo de agua por parte de los agricultores se incrementa por la evapotranspiración natural de los cultivos agrícolas y plantaciones ornamentales.



Gráfica 3. Relación de precipitación, temperatura y evaporación anual, elaboración propia con datos de la estación climatológica Muyuguarda, (fuente ERIC, del año 1921 a 1988).

1.2 Estado actual del sistema lacustre de Xochimilco, año 2017. *Descripción de la fisiografía lacustre, zonificación de canales y cuerpos de agua.*

Según datos contenidos en el informe *Análisis del estado de conservación ecológica del sistema lacustre chinampero de la superficie reconocida por la UNESCO como sitio Patrimonio de la Humanidad en Xochimilco, Tláhuac y Milpa Alta. Aspectos hidráulicos*, elaborado por el Programa Universitario de Medio Ambiente (PUMA, 2014), para el año 2014 el sistema lacustre abarcaba una superficie aproximada de 6.7 kilómetros cuadrados, compuesta por lagos naturales, cuerpos de agua artificiales y una red de canales y apantles. La zona de estudio delimitada en el presente documento, cuenta con una superficie de agua de 4.6 millones de metros cuadrados, y no abarca la zona lacustre de las delegaciones Tláhuac y Milpa Alta.

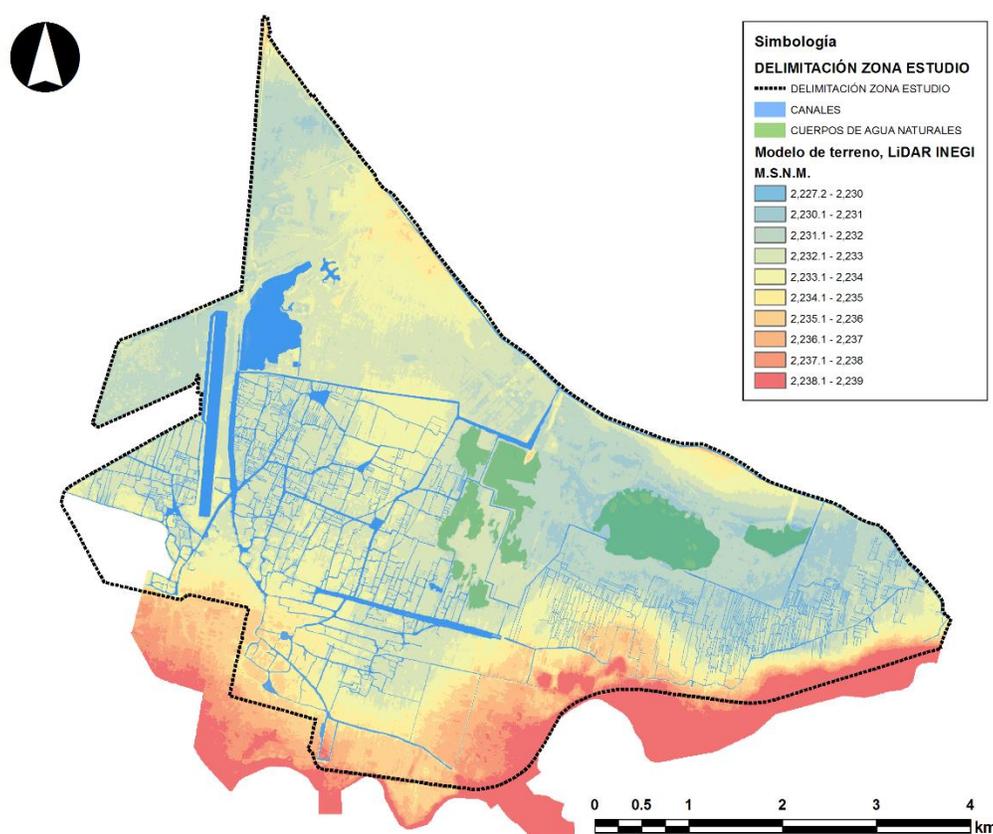


Figura 4. Estimación de canales y cuerpos de agua naturales al interior de la poligonal de estudio. Elaboración propia con información procedente de Google Earth con fecha de febrero de 2017.

Para el desarrollo del proyecto, la información cartográfica referente a chinampas y cuerpos de agua fue actualizada dentro de la poligonal de estudio. Para ello, se digitalizaron imágenes de satélite del servicio Google Earth con fecha de febrero de 2017. De este trabajo, se obtuvo que la zona lacustre aún cuenta con una superficie aproximada de 299.54 ha de canales y 161.02 ha de lagos y cuerpos de agua naturales (Figura 4). Esta última superficie es variable a lo largo del año, incrementándose en temporada de lluvias y disminuyendo en temporada de estiaje.

Zonificación de la zona de estudio y plataformas de agua.

La zona lacustre de Xochimilco se encuentra seccionada por 22 estructuras de control hidráulico como represas y compuertas. Dichas estructuras ayudan a controlar y dividir el sistema lacustre por el nivel de las aguas acorde a las necesidades de cada sitio, (PUMA, 2014). Dichas estructuras (compuertas, represas, esclusas) subdividen la zona lacustre en nueve grandes plataformas de agua, en las cuales los espejos de agua mantienen cotas diferentes.

Para estimar la altura media de cada una de las nueve plataformas de agua, se recurrió a la utilización de un modelo digital de elevación de alta resolución de tipo terreno, elaborado por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía INEGI, del año 2011. Dicho modelo se genera mediante la tecnología LiDAR, que consiste en la detección y medición a través de la luz reflejada por el terreno, o para el caso de estudio, la luz reflejada por los cuerpos de agua. En la Figura 5 se muestra el modelo de terreno correspondiente a la zona de estudio, clasificando la elevación en intervalos de 1 metro. En ella se observa la altura media del espejo de agua de canales y cuerpos de agua naturales, así como la variación en la altura de chinampas.

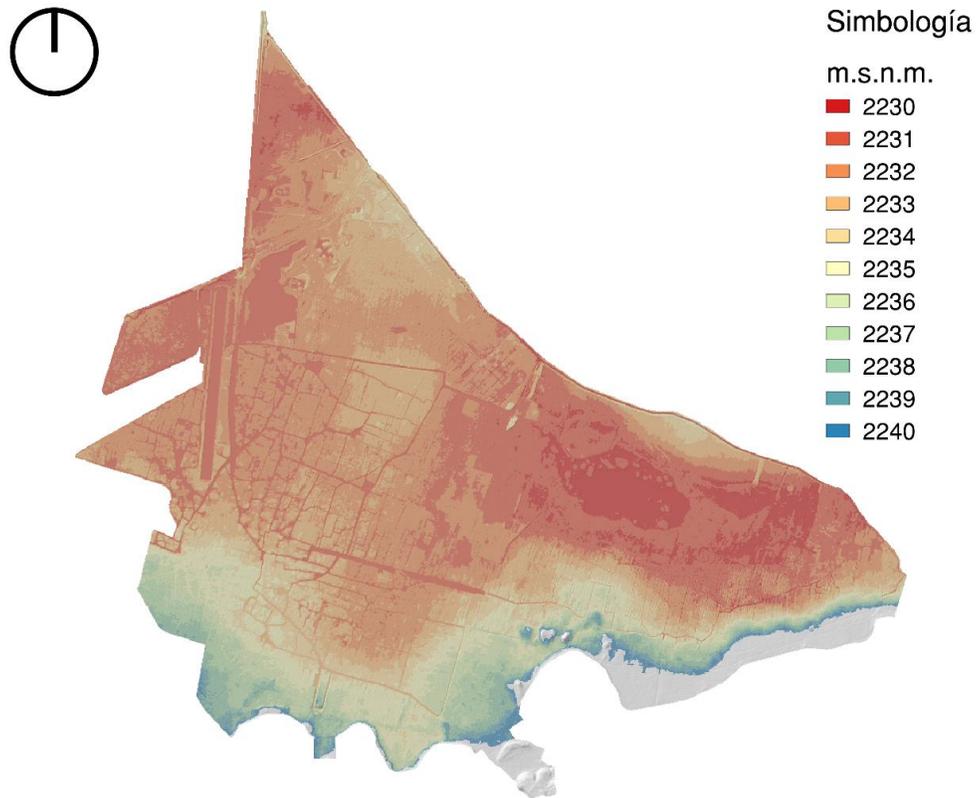


Figura 5. Modelo digital de alta resolución, tipo terreno, LiDAR, (INEGI 2011).

La clasificación de las plataformas de agua, se desarrolló numerando de menor a mayor en función de la altura de su cota media, nombrado a la *zona 1*, la plataforma ubicada en la cota más alta (zona 1, cota promedio 2233.5 m.s.n.m.), y la *zona 6* en la cota más baja (zona 6, cota promedio 2230.5 m.s.n.m.). La zona 8 corresponde al espejo de agua que forma Canal de Chalco, mientras que la zona 7 corresponde al espejo de agua de la pista de canotaje de Cuemanco.

Espacialmente, las cotas más elevadas se ubican al sur y suroeste de la poligonal, en la zona de los embarcaderos de Nativitas y Caltongo, mientras que al noreste se localizan los espejos de agua más bajos, en la Ciénaga de San Gregorio. Se estima que la diferencia existente entre la plataforma de agua más elevada a la más baja es de aproximadamente 3 metros (Figura 6). Esta situación genera el drenando del agua para dar salida de manera natural a los canales de Chalco y Canal Nacional.

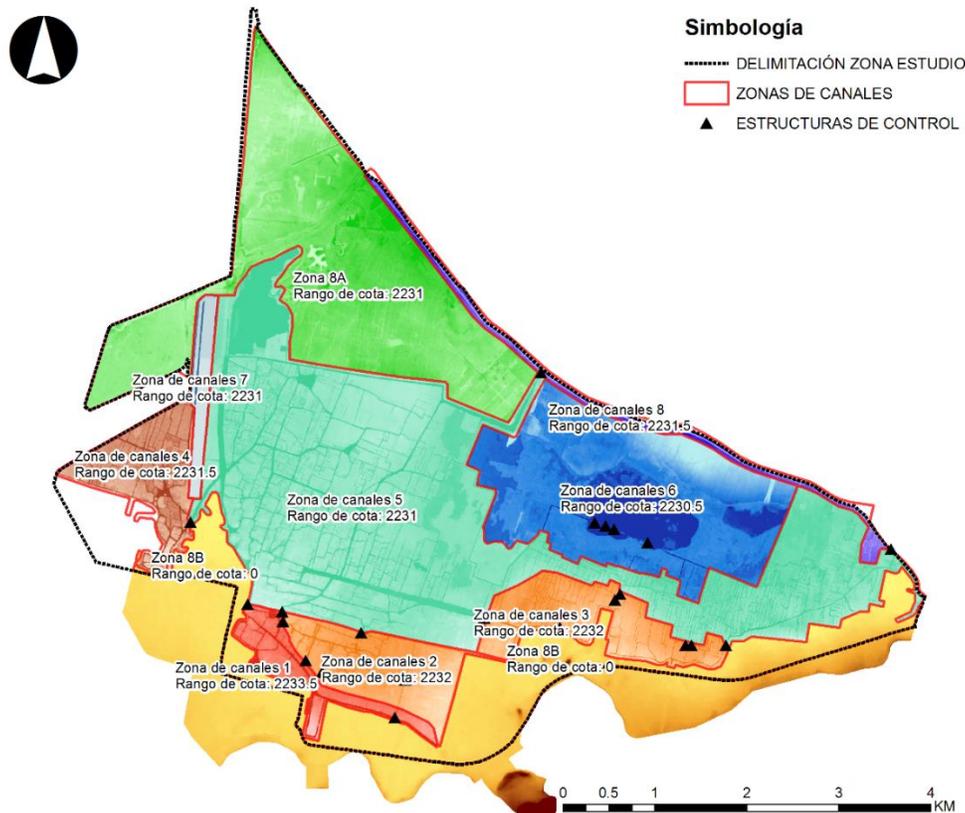


Figura 6. Subdivisión de la poligonal de estudio en función de las estructuras de control y elevación media. Elaboración propia con información PUMA (2014).

Finalmente se subdividió la poligonal de estudio en 10 zonas, nueve de ellas corresponden a la subdivisión dada por las estructuras de control hidráulico previamente establecidas, mientras que la décima corresponde a la superficie sin presencia de agua pero que colinda con antiguas zonas chinamperas y de invernaderos. A continuación se presenta la tabla resumen de los resultados de las superficies de agua presentes en cada una de las 10 zonas. Los cuerpos de agua se clasificaron de la siguiente manera: canales menores (hasta 5 metros), canales medios (de 5 a 10 metros de ancho), canales mayores (más de 15 metros de ancho), cuerpos de agua sin variación (cuerpos de agua artificiales) y cuerpos de agua naturales; dicha clasificación corresponde a la contenida en el informe anteriormente citado (PUMA, 2014).

Tabla 1. Superficies de agua presente por zona (m²). Elaboración propia.

	Canales menores (5 m)	Canales medios (5 - 10 m)	Canales mayores (15 m <)	Cuerpos de agua sin variación	Cuerpos de agua naturales	Superficie total de canales (m ²)	Superficie total de agua (m²)
ZONA 1	1,864.70	48,419.88	57,777.20	23,049.17	-	131,110.95	131,110.95
ZONA 2	13,149.03	48,074.29	16,715.21	-	-	77,938.53	77,938.53
ZONA 3	87,721.73	43,337.09	-	-	-	131,058.82	131,058.82
ZONA 4	37,377.82	99,186.62	37,116.72	16,304.31	-	189,985.47	189,985.47
ZONA 5	492,741.67	449,262.94	504,296.76	546,908.72	389,862.44	2,383,072.52	2,383,072.52
ZONA 6	6,172.02	13,178.48	-	-	1,220,298.11	1,239,648.62	1,239,648.62
ZONA 7	-	-	-	325,771.62	-	325,771.62	325,771.62
ZONA 8	6,326.61	98,155.61	281.04	-	-	104,763.26	104,763.26
ZONA 8A	-	-	-	22,182.61	-	22,182.61	22,182.61
ZONA 8E	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Total:	645,353.58	799,614.90	616,186.94	934,216.43	1,610,160.55	2,995,371.85	4,605,532.40

1.3 La importancia del agua residual tratada como principal recurso hídrico artificial del sistema lacustre. *Operación de las PTAR vinculadas al sistema lacustre.*

A partir del año 1970 la zona lacustre de Xochimilco carece de sus fuentes naturales de agua, manantiales, escurrimientos y afloramientos. Estas fuentes han sido entubadas y canalizadas para dotar de agua limpia a los habitantes de la Delegación Xochimilco principalmente y parte del sur de la Ciudad de México. Esta situación genera que el sistema lacustre dependa del aporte continuo de ART para mantener el nivel de agua en canales y cuerpos de agua en temporada de estiaje, (PUMA, 2014).

De las 24 plantas de tratamiento de agua residual que hay en la Ciudad de México, únicamente tres son las encargadas de dotar de ART a la zona de estudio. La primera y más importante es Cerro de la Estrella, ubicada en la Delegación Iztapalapa, le sigue la planta de San Lorenzo ubicada en la Delegación Tláhuac y finalmente la planta de San Luis Tlaxialtemalco localizada en la Delegación Xochimilco (García, 2015). En la Figura 7, se presenta la ubicación de las tres PTAR, Cerro de la Estrella, San Lorenzo y San Luis Tlaxialtemalco así como la red de distribución de ART (línea café).

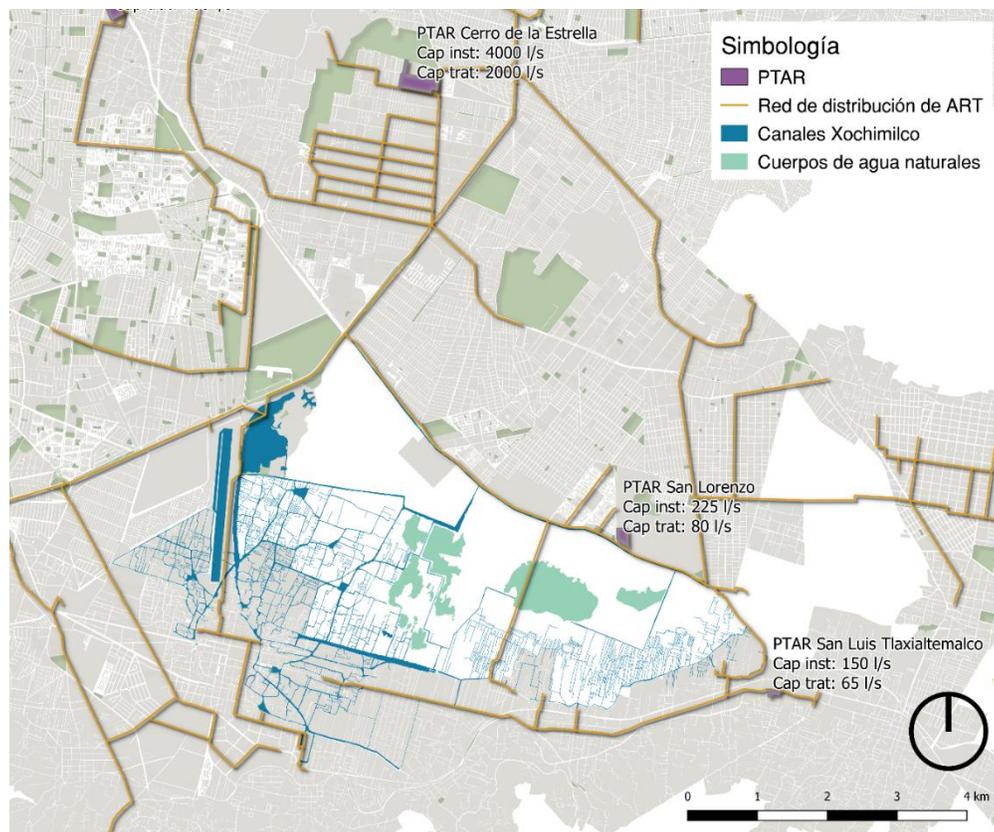


Figura 7. Localización de las PTAR y red de distribución a la zona lacustre de Xochimilco. Elaboración propia. Fuente SACMEX, 2014.

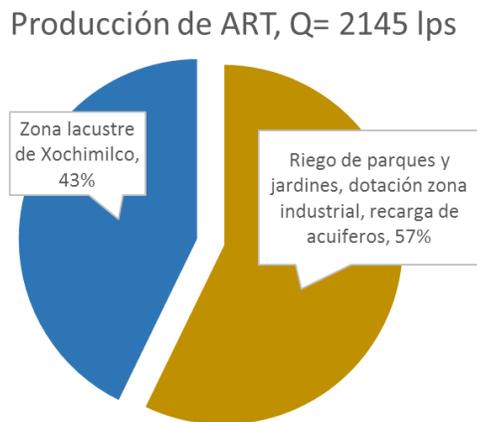
En conjunto las tres plantas antes mencionadas cuentan con una capacidad de diseño para tratar un gasto de hasta $Q=4,375$ lps, lo que se conoce como capacidad instalada. Pero desafortunadamente según datos reportados por SACMEX, dichas plantas operan al 49% de su capacidad de diseño, produciendo un gasto de $Q=2,145$ lps, (PUMA, 2014) (Tabla 2).

Tabla 2. Capacidad de tratamiento de agua residual. Fuente PUMA, 2014.

Planta de tratamiento de agua residual	Capacidad Instalada (lps)	Capacidad tratada (lps)	Porcentaje
Cerro de la Estrella	4,000	2,000	50%
San Lorenzo	225	80	36%
San Luis Tlaxialtemalco	150	65	43%
Total	4,375	2,145	49%

Del volumen total de agua residual que es tratado, el 57% ($Q=1,220$ lps) es utilizado en sitios no relacionados a la zona lacustre de Xochimilco, como son el riego de parques, centros

deportivos y jardines así como la dotación de ART a zonas industriales de la Delegación Iztapalapa. Asimismo se reporta que parte de dicho porcentaje está destinado a la recarga del acuífero utilizando el método de infiltración en una instalación acorde, ubicada en la Delegación Tláhuac, Gráfica 4, (García, 2015).



Gráfica 4. Distribución del ART. Elaboración propia, Fuente SACMEX, 2014.

El 43% restante del agua residual que es tratada ($Q=975$ l/s) es suministrada a la zona lacustre de Xochimilco (Gráfica 4), a través de 16 tomas ubicadas principalmente en la periferia de la poligonal de estudio. Doce tomas se localizan en la parte sur, que corresponde a las cotas más elevadas, como se mencionó en el apartado anterior, alimentando por gravedad a las zonas ubicadas en cotas menores. Dos tomas se encargan de abastecer a la Pista de Remo y Canotaje Virgilio Uribe de Cuemanco y al Parque Ecológico de Xochimilco. A continuación se presenta la ubicación de las 16 tomas que suministran ART a la zona lacustre, quedando representadas con un asterisco azul (Figura 8). Asimismo se presenta el nombre con el cual se identifica cada toma de agua y el gasto que suministran. Según datos de SACMEX reportados al año 2014, tres tomas se encuentran fuera de servicio.

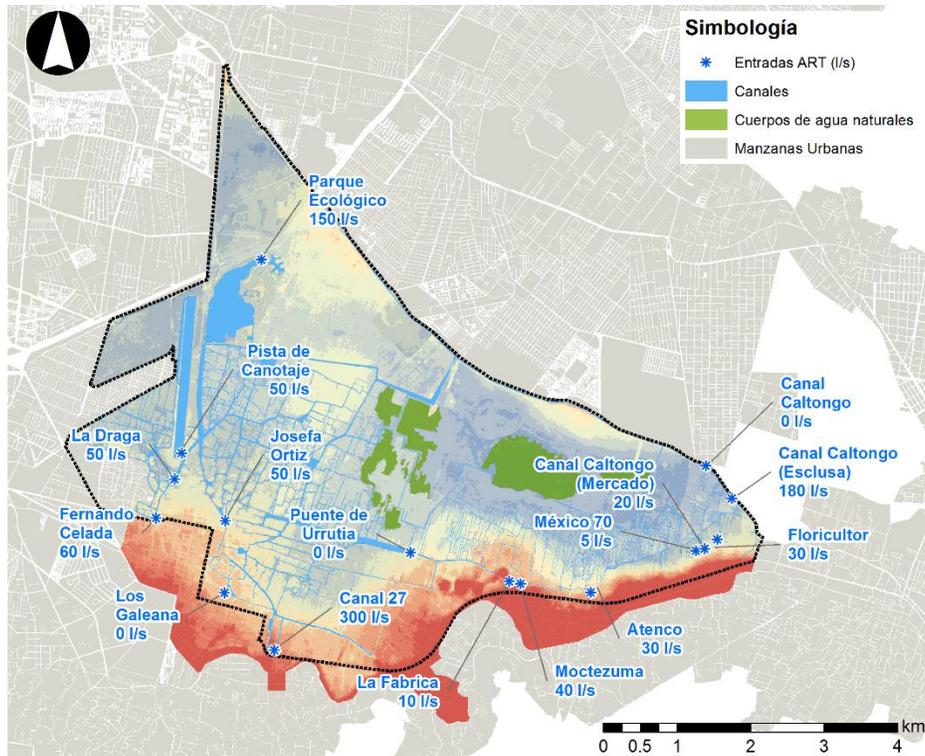


Figura 8. Localización de puntos de suministro de ART a la zona lacustre de Xochimilco. Elaboración propia. Fuente de gastos de entrada SACMEX 2014.

Comparación de valores reportados por SACMEX y los contenidos en el informe técnico PUMA 2014.

En la Tabla 3 están organizadas las 16 tomas de ART registradas en la zona lacustre. En la columna tres se ubican los gastos proporcionados por SACMEX para el año 2014, mientras que en la columna cuatro, se encuentran los aforos contenidos en el informe *Análisis del estado de conservación ecológica del sistema lacustre chinampero de la superficie reconocida por la UNESCO como Sitio Patrimonio de la Humanidad en Xochimilco, Tláhuac y Milpa Alta. Universidad Nacional Autónoma de México, México, (PUMA, 2014).*

A partir de este momento nos referiremos a dicho informe como *PUMA 2014*. Como se observa en dicha tabla, en los gastos reportados por SACMEX al año 2014, existen dos tomas con un gasto reportado de 0 l/s, y dos tomas sin datos; mientras que en PUMA 2014 se reporta un gasto de 0 l/s en siete de los 16 puntos de suministro de ART.

El gasto total de ART encontrado en el informe *PUMA 2014* es de apenas $Q=199.71$ l/s, que corresponden al 20% de lo reportado por SACMEX ($Q=975$ l/s) para el mismo año (PUMA,

2014), Tabla 3. Asimismo, dicho gasto representa apenas el 4.5% de la capacidad total instalada en las tres PTAR asociadas a la zona lacustre, las cuales cuentan con una capacidad total de 4,375 l/s.

Tabla 3. Caudales de suministro de ART. Datos de SACMEX 2014 contrastados con caudales PUMA 2014. Fuente PUMA, 2014.

N°	Nombre del punto de entrega	Gasto SACMEX 2014 (l/s)	Gasto PUMA 2014 (l/s)
1	PARQUE ECOLÓGICO	150	0
2	LA DRAGA	50	60
3	FERNANDO CELADA	60	7.98
4	LOS GALEANA	0	0
5	CANAL 27 (EMBARCADEROS ZACAPA)	300	61.7
6	CANAL CALTONGO	0	0
7	CANAL CALTONGO (ESCLUSA)	180	0
8	CANAL CALTONGO (MERCADO)	20	2.64
9	FLORICULTOR	30	1.9
10	MEXICO 70	5	0
11	ATENCO	30	32
12	LA FABRICA	10	1.49
13	MOCTEZUMA	40	10
14	JOSEFA ORTIZ	50	22
15	PUENTE DE URRUTIA	N/A	0
16	PISTA DE CANOTAJE	50	0
Total		975	199.71

La diferencia presente entre los gastos reportados por SACMEX y los aforados por el IINGEN conllevan consecuencias observables en la zona de canales y chinampas. Durante los recorridos a la zona de estudio (realizados durante el mes de junio, 2017) para la aplicación de encuestas de campo, habitantes y trabajadores del lugar reportaban que el volumen de ART suministrado les resultaba insuficiente para mantener en óptimas condiciones el sistema lacustre. Hay presencia de canales con niveles mínimos de agua sin posibilidad de ser navegables, y un descenso general en el nivel de agua. Retomando el hecho de que las PTAR son la principal y única fuente de agua en temporada de estiaje, sin considerar los aportes de agua residual cruda de descargas clandestinas, es indiscutible la dependencia del sistema lacustre a dicha fuente.

Analizando la capacidad instalada de las PTAR vinculadas a la zona lacustre reportada por SACMEX, existe el potencial de incrementar la entrega de ART un 300%, sin comprometer los 1,220 l/s destinados a la dotación de otros consumidores como son la industria y el riego de parques y jardines entre otros. Esto es, si se aprovecha el 100% la capacidad instalada en las PTAR antes mencionadas, se incrementaría el gasto disponible de ART, pasando de Q=975 l/s a casi Q=3,200 l/s, como se observa en la Tabla 4.

Tabla 4. Incremento potencial en los gastos de entra de ART, tomando como referencia los gastos reportados por SACMEX 2014, e incrementados a la capacidad total instalada de las PTAR. Elaboración propia.

N°	Nombre del punto de entrega	Gasto SACMEX, año 2014 (l/s)	Gasto de SACMEX normalizados a 1	Aprovechamiento de la capacidad instalada - SACMEX (3,200 l/s)
1	PARQUE ECOLÓGICO	150	0.1538	492
2	LA DRAGA	50	0.0513	164
3	FERNANDO CELADA	60	0.0615	197
4	LOS GALEANA	0	0.0000	-
5	CANAL 27 (EMBARCADEROS ZACAPA)	300	0.3077	985
6	CANAL CALTONGO	0	0.0000	-
7	CANAL CALTONGO (ESCLUSA)	180	0.1846	591
8	CANAL CALTONGO (MERCADO)	20	0.0205	66
9	FLORICULTOR	30	0.0308	98
10	MEXICO 70	5	0.0051	16
11	ATENCO	30	0.0308	98
12	LA FABRICA	10	0.0103	33
13	MOCTEZUMA	40	0.0410	131
14	JOSEFA ORTIZ	50	0.0513	164
15	PUENTE DE URRUTIA	0	0.0000	-
16	PISTA DE CANOTAJE	50	0.0513	164
Total		975	1.0000	3,200

Para lograr dicho incremento en la disponibilidad de ART, es imprescindible incrementar el presupuesto destinado a las PTAR y con ello mejorar sus condiciones operativas. Como lo identifico Riveros (2013), la mayoría de las 25 plantas de tratamiento que opera SACMEX, entre ellas Cerro de la Estrella, requieren de un incremento presupuestal destinado a mejorar el mantenimiento. Asimismo Riveros (2013) reporta que, según datos de SACMEX para el año 2013 la PTAR Cerro de la Estrella requería una inversión de \$29.2 millones de pesos para que opere al 100% de su capacidad de diseño.

1.4 Evolución del sistema lacustre en función del recurso hídrico y escenario con tendencia a futuro. *Cambios de estado del sistema lacustre de Xochimilco.*

Para explicar lo que se denomina como “*cambios de estado del sistema lacustre de Xochimilco*”, se utilizó como referencia el marco de trabajo propuesto por el Ecologista Holandés Marten Scheffer. Scheffer propone un marco teórico que busca comprender y explicar cómo se desarrollan los cambios de estado de sistemas complejos, aplicado a los ecosistemas naturales (Scheffer & Carpenter, 2003).

Como en todo sistema, las variables que intervienen en un ecosistema se encuentran interrelacionadas, y la modificación de las condiciones de una o más de éstas puede traer consigo cambios abruptos en el resto del sistema (Scheffer & Carpenter, 2003). Dichas alteraciones pueden ser por factores naturales como antropogénicos, pero sus consecuencias generan un cambio abrupto en el ecosistema. En este sentido, perturbar las condiciones de una variable, por muy sutil que sea, puede generar una retroalimentación tanto positiva como negativa a las características y condiciones de las demás.

Para relacionar dichas variables con el estado que guarda el sistema, utiliza como analogía una malla en representación bidimensional. En la que las variables dan forma a la topografía, generando lo que denomina como cuencas de atracción, puntos bajos donde el sistema encuentra estabilidad. Mientras que el sistema es representado como una esfera que tiende por naturaleza a desplazarse y buscar la estabilidad en los puntos bajos de dicha topografía. Figura 10, basado en Scheffer & Carpenter, 2003.

Cuando una o más variables se modifican generan cambios en la topografía, provocan la aparición de nuevas cuencas de atracción y la inestabilidad del sistema. El proceso de aparición y desplazamiento del sistema a una nueva cuenca de atracción, genera lo que Scheffer denomina una “transición catastrófica” (Scheffer & Carpenter, 2003). Es así como el autor da explicación al porqué los ecosistemas pueden cambiar repentinamente, y mantenerse de forma permanente en ese nuevo estado (Figura 9).

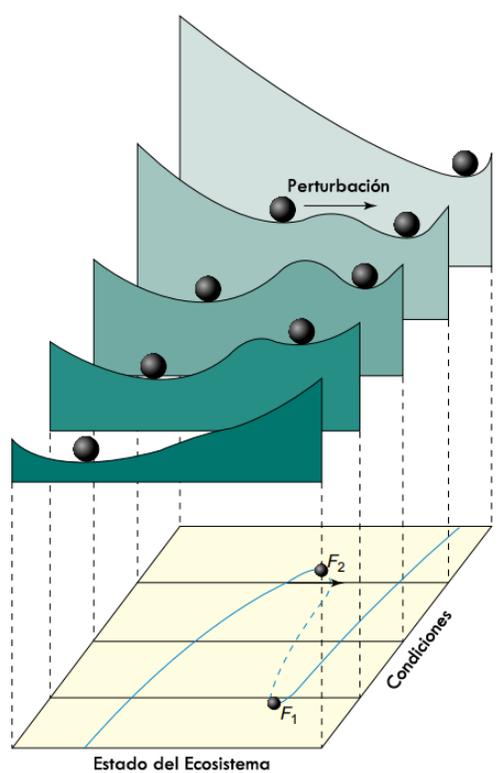


Figura 9. Cuencas de atracción generadas por el estado de las variables y su influencia en los estados de equilibrio del ecosistema (Scheffer & Carpenter, 2003).

Asimismo, el autor retoma el concepto de resiliencia, entendida como la capacidad que tiene un sistema de regresar a sus condiciones originales después de un evento extremo, para explicar por qué ciertos ecosistemas son más o menos propensos al cambio. Scheffer denomina resiliencia a la profundidad de un valle o cuenca de atracción, generada por las condiciones que guardan las variables y las condiciones externas; entre más profunda la cuenca de atracción mayor será la resiliencia del sistema y la dificultad de poderlo desplazar a un nuevo estado de equilibrio.

Al contrario, en la medida que la resiliencia del sistema disminuye se incrementa la vulnerabilidad a sufrir un cambio, es decir, se disminuyen las fronteras de la cuenca de atracción facilitando la posibilidad del sistema de ser desplazado a otro estado a consecuencia de una perturbación (Scheffer & Carpenter, 2003). Para el caso de estudio es importante buscar los mecanismos que permitan incrementar la resiliencia del sistema lacustre en las condiciones actuales y evitar su cambio de estado. En este sentido, una variable que puede reforzar la resiliencia del sitio sería el incremento en la disponibilidad del recurso hídrico así como reforzar las infraestructuras destinadas a la dotación del mismo.

Asimismo entender las lógicas que han llevado a la zona lacustre al estado actual, y al mismo tiempo comprender qué es muy difícil recuperar el estado natural del sistema lacustre que actualmente existe. Cuando un ecosistema modificado encuentra estabilidad en una cuenca de atracción difícilmente será posible regresarlo a su estado original (Scheffer & Carpenter, 2003).

Los cambios de estado del sistema lacustre en función de la disponibilidad del recurso hídrico.

La zona lacustre de Xochimilco es un ecosistema que por su naturaleza es sensible a la alteración que experimente la variable hídrica. Como ejemplo de ello y retomando el marco de trabajo propuesto por Scheffer (2003), la Ciudad de México compensó la desaparición de las fuentes de agua naturales por fuentes alternas entre los años 1950 a 1970, modificando con ello el sistema lacustre, pasando de ser natural a uno artificial. A partir de dicha transformación de la variable hídrica, reemplazando las fuentes naturales de agua por fuentes de ART se presentó un cambio radical del sistema, caracterizándose actualmente por su dependencia a fuentes artificiales de agua.

El detonante de cambio en el estado del ecosistema lacustre, fue principalmente el entubamiento de afloramientos de agua y manantiales así como el encausamiento de los escurrimientos principales a la red de drenaje de la ciudad, provocando en la década de los cincuenta la desecación casi total de los lagos y canales (CORENA, 2011).

En este contexto, fue necesario construir la PTAR Cerro de la Estrella, localizada en la Delegación Iztapalapa para compensar la pérdida de agua (CORENA, 2011), como se vio en el inciso 1.3 del presente documento. A partir de esta fecha (1970) la zona lacustre se mantiene de manera artificial, cambiando completamente su naturaleza, pasando de un sistema lacustre natural, a un sistema lacustre antropogénico, dependiente de fuentes artificiales (Figura 10). Transformación definida como *lacustre natural* a *lacustre artificial*, acompañada de la pérdida y extinción permanente del Pescado Blanco (Atherinopsidae) y la Almeja de Xochimilco (CORENA, 2011).

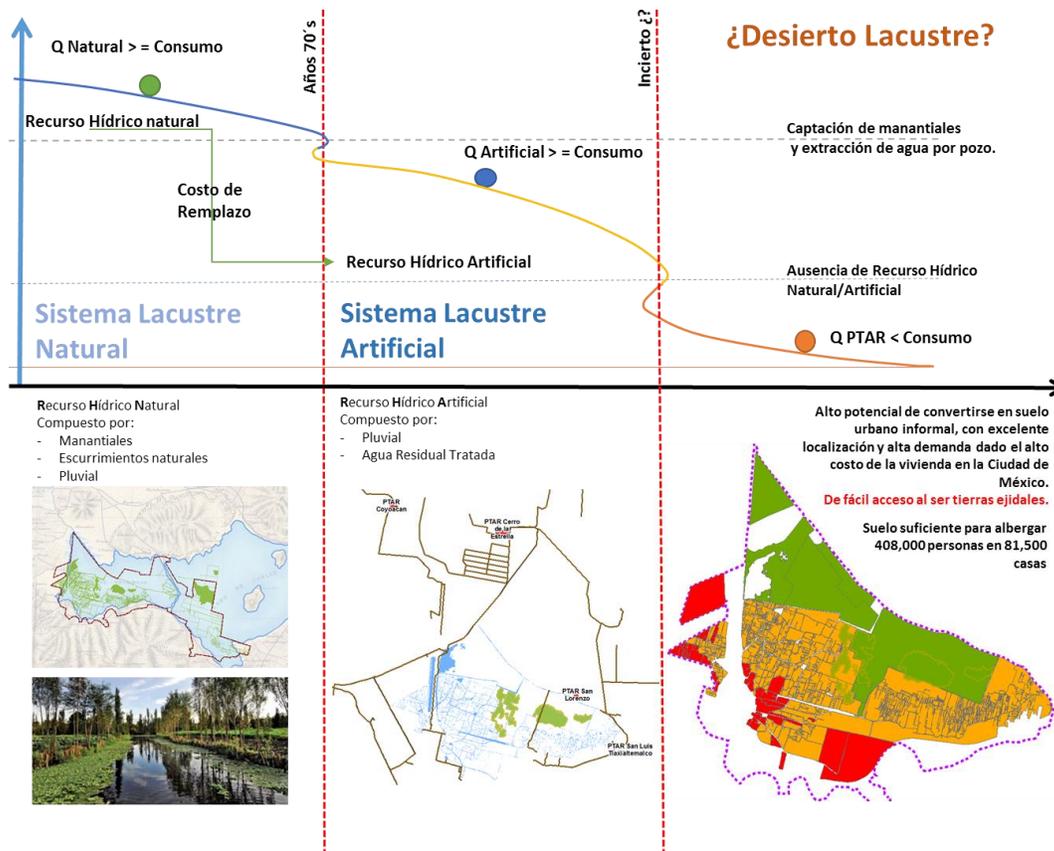


Figura 10. Cambios de estado del sistema lacustre de Xochimilco, elaboración propia, tomado como referencia Scheffer (2003).

En la Figura 10 se observa que la variable hídrica es la que impulsa o determina los cambios de estado del sistema lacustre de Xochimilco. Éste evoluciona de un *Sistema Lacustre Natural* (primera columna de izquierda a derecha), en el cual el recurso hídrico está compuesto por fuentes naturales como manantiales, escurrimientos y agua pluvial a lo denominado *Sistema Lacustre Artificial* (columna del centro), caracterizado el recurso hídrico por estar compuesto de agua residual tratada, acompañado de agua pluvial en los meses de lluvias, sin olvidar las descargas de agua residual sin tratamiento vertido por asentamientos irregulares de manera permanente a lo largo del año.

Este *Sistema Lacustre Artificial* corre el riesgo de transformarse en un *Desierto Lacustre* (tercera columna de izquierda a derecha), si disminuye o desaparece el aporte de ART, generando una transformación completa del entorno. Como propone Scheffer (2003), el cambio de estado de una cuenca de atracción a otra puede desencadenar un proceso irreversible.

Para evitar que se genere este tercer cambio en el sistema lacustre, es necesario incrementar la resiliencia del sistema. Asimismo incrementar la profundidad de la cuenca de atracción en la que se encuentra actualmente el sistema lacustre, implica reforzar las fuentes hídricas y garantizar la continuidad y calidad de estas a largo plazo. El incremento en la resiliencia del sistema lacustre de Xochimilco depende del reforzamiento del sistema artificial que le da vida, sin caer en el error de considerarla como la única o principal variable de atención inmediata.

También es importante considerar la presión generada por la expansión de la mancha urbana dentro de la zona, caracterizada por asentamientos humanos informales con viviendas de autoproducción precaria, “se trata de inmuebles contruidos con materiales no permanentes sin un proyecto arquitectónico definido, a través de procesos de autoconstrucción” (Kunz Bolaños, 2003, p. 192). Asimismo Kunz (2003) señala que dado que existen irregularidades tanto en la ocupación como en la compraventa del predio, no cuentan con los servicios urbanos básicos como agua, drenaje, electricidad. Por lo tanto es común encontrar descargas de agua residual cruda sobre las márgenes de los canales. En el Capítulo 3, se plantea abordar el tema de la zona lacustre de Xochimilco con un enfoque urbano-hidrológico, analizando la relación que existe entre la parte urbana (con sus respectivas implicaciones sociales) y la parte hídrica que compone al sistema lacustre.

Es importante acotar que la presente investigación se enfoca al estudio de la variable hídrica, tomando algunas condiciones sociales, urbanas y ambientales que se relacionen estrechamente con el tema del agua de manera complementaria. Aunado al tema del manejo del recurso hídrico, se reportan otros problemas como son la potencial contaminación del acuífero, hundimientos y aparición de grietas propiciadas por la extracción de agua subterránea y efectos sísmicos. Circunstancias que suponen un riesgo para la continuidad del sistema lacustre de Xochimilco pero que de igual manera no son abordados en profundidad en el presente documento.

2. Economía del recurso hídrico artificial.

2.1 Valoración económica de servicios ecosistémicos.

Los servicios ecosistémicos son todos aquellos beneficios que las comunidades humanas obtienen de los ecosistemas naturales que los rodean. Se encuentran clasificados en cuatro categorías dependiendo de la función que prestan a la comunidad, provisión, regulación, soporte y de valor cultural. Dentro de los primeros como su nombre lo indica son todos aquellos que la naturaleza provee a la comunidad, como la dotación de agua limpia, la generación de alimentos, materiales renovables para construcción como la madera, bambú, etc. Los servicios de regulación ayudan a contrarrestar las condiciones ambientales desfavorables para el ser humano, la regulación climática y con ello la regulación de inundaciones y sequías, la retención de suelo y nutrientes, entre otros (Millennium Ecosystem Assessment, 2005).

Los servicios de soporte son la base de los anteriores y mantienen las funciones principales de los ecosistemas, como el ciclo del agua, los ciclos de nutrientes, la captura de carbono, entre otros. Finalmente y no menos importantes se encuentran los servicios culturales, que a pesar de no representar beneficios tangibles por su naturaleza no material, las comunidades se ven beneficiadas con aspectos como la posibilidad de recreación, la apreciación de la belleza paisajística o el simbolismo espiritual que la existencia de un sitio representan para la comunidad (Millennium Ecosystem Assessment, 2005).

Toda esta variedad de beneficios que provee la naturaleza al ser humano son irremplazables, y su uso no trae consigo un costo económico a la sociedad. Por ello, se afirma que el sistema social depende del estado de conservación del ambiente, y este a su vez influye en la calidad de los servicios ambientales que prestan (Daily, 1997). Sin embargo, históricamente el desarrollo de las comunidades humanas ha traído consigo la degradación de los ecosistemas naturales a costa de un mal entendido desarrollo, donde la sobreexplotación de los recursos genera una pérdida gradual de los servicios ecosistémicos (Daily, 1997).

Así nace la idea de identificar y valorar económicamente los servicios ecosistémicos y con ello poder expresar en términos monetarios el valor que poseen. La importancia de asignar

un valor monetario a algo que en principio no tiene un valor en el mercado, radica en que éste se convierte en un referente que ayuda dentro de los procesos de toma de decisiones (Daily, 1997). Para un grupo en concreto será más fácil determinar la opción más rentable a largo plazo en función de lo que dejará de percibir la sociedad por la pérdida de dicho recurso bajo un proceso desmedido de sobreexplotación (Daily, 1997); o como en el caso de estudio por la inacción en mantener y reforzar las fuentes del recurso hídrico artificial.

Por ello para asignar un valor monetario a los servicios que provee la naturaleza, se han desarrollado metodologías conocidas como *Valoración económica de servicios ecosistémicos*. Dichos instrumentos que buscan expresar en términos monetarios una parte del valor que posee el ecosistema o recurso ambiental valorado (Balvanera, et al., 2011). Transformando los beneficios ambientales en activos dentro de los procesos productivos de cualquier actividad económica que dependa de ellos. Y con ello poder realizar un uso más responsable y sustentable de los ecosistemas y los servicios que proveen (Balvanera, et al., 2011).

2.2 El valor del recurso hídrico artificial para la zona lacustre de Xochimilco.

El ecosistema de la zona lacustre de Xochimilco presta a la zona sur de la Ciudad de México una serie de servicios eco-sistémicos como son la humedad atmosférica que ayuda a la regulación térmica (2°C menos que la zona centro de la Ciudad de México, inciso 1.1 del presente documento) así como la provisión de agua subterránea entre otros. Beneficios que a escala regional son difíciles de cuantificar en términos monetarios pero representan una mejora directa en la calidad de vida de los habitantes de la urbe.

A escala local la presencia de la zona lacustre de Xochimilco trae consigo beneficios económicos a los habitantes de la zona lacustre, los cuales pueden ser estimados en términos económicos y ser utilizados como parámetro del valor económico de dicho recurso.

En este punto es importante aclarar que al hablar del recurso hídrico artificial se hace referencia al agua residual tratada (ART) ya que es el recurso de sustitución de los ingresos

naturales de agua, como lo fueron los manantiales, escurrimientos y afloramientos, de los que fue privada la zona lacustre en la década de 1970.

- Estimación del valor económico del Agua Residual Tratada (ART), en función de dos actividades económicas presentes en la zona lacustre de Xochimilco.



Figura 11. Propuesta de estimación del valor económico del agua residual tratada en función de las principales actividades económicas en la zona lacustre.

Como se plantea en la Figura 11, la agricultura y el turismo son las dos actividades económicas principales que se relacionan estrechamente con el recurso hídrico artificial. Estas serán utilizadas para estimar el valor económico del ART a partir de su valor de uso, y contrastar los beneficios económicos que obtiene la población frente al costo de operación que tienen las plantas de tratamiento de aguas residuales encargadas de dotar dicho recurso a la zona lacustre.

Como primera actividad económica a analizar, se encuentra la producción agrícola, la cual, se desarrolla al interior de la zona chinampera de Xochimilco, San Luis Tlaxialtemalco y San Gregorio Atlapulco, generando empleos directos para los habitantes de la región. El agua empleada para el riego es bombeada principalmente de canales y cuerpos de agua de la zona lacustre, los cuales mantienen su nivel gracias al aporte de agua residual tratada. Asimismo, la venta de plantas en los mercados Madre Selva de Nativitas y Xochimilco Ecológico y la venta de insumos agrícolas dependen de manera indirecta de la existencia del sistema

chinampero para subsistir, por lo tanto, también son dependientes de la presencia de agua residual tratada.

La segunda actividad económica se relaciona con el turismo, conocida como *paseo turístico en trajinera*. Esta actividad depende directamente de la presencia de agua en canales y cuerpos de agua, por la necesidad de ser navegables. Al igual que la anterior, genera empleos de manera tanto directa como indirecta y parte del valor del recurso será equivalente a la derrama económica que genera durante un año promedio. Cabe aclarar que en el presente trabajo no se analizarán las actividades económicas y empleos relacionados como son la venta de alimentos, bebidas de todo tipo, venta de artesanías, músicos, dulces, etc., dado que son actividades complementarias que podrían existir aun, sin la existencia del paseo en trajinera.

En los siguientes dos subcapítulos se describen las metodologías utilizadas para estimar el valor económico del recurso hídrico artificial en función de las actividades señaladas, agricultura y turismo. Cabe aclarar que los valores monetarios no representan el valor económico total de dicho recurso, ni de todos los servicios ambientales que presta la zona lacustre. Estos indicadores son solo un referente para contrastar los beneficios obtenidos frente a los costos que involucran la operación y mantenimiento de las plantas de tratamiento de agua residual encargadas de mantener una dotación constante a la zona lacustre.

2.3 Estimación del valor económico del agua superficial para la actividad agrícola de la zona lacustre de Xochimilco bajo la metodología de costo de reemplazo.

2.3.1 Objetivo.

El presente apartado tiene como objetivo estimar parte el valor económico del recurso hídrico artificial presente en la zona lacustre de Xochimilco, en función de estimar el costo de sustituir el agua tomada de canales y cuerpos de agua, por cuatro fuentes alternas. Cabe aclarar que el objetivo no busca estimar el valor económico del agua en función de la pérdida de la actividad agrícola.

2.3.2 Metodología de valoración de costo de reemplazo.

Se reconoce que el agua residual tratada es un insumo importante para la actividad agrícola de la zona (actividad que se caracteriza por la utilización de invernaderos y el bombeo de agua de los canales para riego). Para estimar el valor económico del agua se propone utilizar la metodología de costo de reemplazo. Para el presente ejercicio la metodología toma como base el supuesto de la desaparición de las plantas de tratamiento de agua residual, principales aportes de agua en temporada de estiaje (recurso hídrico artificial) presentes en la zona lacustre. Reemplazando la fuente actual por fuentes alternas, que en este caso serán: la red de distribución de agua limpia, la dotación de agua limpia en camión cisterna, y la cuota por dotación directa de agua residual tratada de nivel secundario y terciario.

El valor económico del agua será el equivalente al valor de consumo total para riego agrícola tomada de estas cuatro fuentes, con sus tarifas vigentes al año 2017. La metodología se divide en cuatro etapas para llegar a la estimación económica del recurso hídrico artificial, las cuales se describen a continuación:

Etapa 1. La etapa 1 consiste en el reconocimiento, digitalización y cuantificación de la zona chinampera, identificando las que mantienen una producción agrícola en invernadero. Esta etapa busca establecer la superficie que es consumidora potencial de agua para riego de plantas de ornato.

Etapa 2. Consiste en establecer los principales productos agrícolas que se producen en la región. Para establecer estos productos se recurrió a información procedente del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, SIAP, del portal de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación, SAGARPA. Esta base de datos cuenta con información sobre el tipo de planta cultivada, las superficies sembradas, así como su rentabilidad económica por hectárea y tonelada cultivada.

Etapa 3. Consiste en definir la metodología utilizada para estimar los consumos de agua que requieren las plantas producidas en invernadero, esto es, el volumen de agua que requieren para desarrollarse hasta su punto de floración y venta. Se estableció un consumo promedio mensual, para tener un parámetro de consumo global promedio en la zona de invernaderos.

Etapa 4. Finalmente, se estima el volumen de agua que se requiere para mantener la actividad agrícola y el costo de sustituir la fuente original por las cuatro fuentes alternas. La primera parte de la etapa cuatro consiste en cruzar la información referente a la superficie potencial de riego (m^2), con el consumo promedio mensual que requieren las plantas para desarrollarse (m). El resultado, es el volumen total (m^3) consumido en el riego agrícola, el cual es transformado a valor monetario, tomando como base las tarifas vigentes contenidas en el código fiscal de la Ciudad de México. Cabe aclarar que para el caso de la Ciudad de México, la tarifa que se cobra por el agua, únicamente contempla el cobro por el servicio de distribución y abastecimiento por parte del Sistema de Agua de la Ciudad de México, y no por el líquido.

2.3.3 Aplicación de la metodología a la zona lacustre de Xochimilco.

La zona lacustre de Xochimilco es un territorio heterogéneo conformado por usos de suelo y ocupación territorial diversos, entre los que se encuentra la conservación, la agricultura, el equipamiento rural, y la presencia de asentamientos humanos. Este último se caracteriza principalmente por ser de carácter informal, con carencia de servicios entre los que destaca la red de drenaje y alcantarillado.

Para el año 2015 el SIAP tiene registrada una superficie sembrada de 121 ha, ocupada principalmente por invernaderos distribuidos en la zona de chinampas. Lamentablemente, los procesos de urbanización que se presentan en el sitio han generado una tipología de paisaje mixta, con viviendas e invernaderos mezclados (Figura 12), complicando la labor de cuantificación y registro de superficie agrícola. En la parte suroeste de la poligonal de estudio existe presencia casi nula de viviendas, que contrasta con una alta concentración de invernaderos.



Figura 12. Chinampa tipo, interrelación de vivienda con invernaderos en la zona de Producción Rural Agroindustrial. Fuente: Google Earth, febrero, 2017.

Etapa 1. Digitalización de la superficie agrícola.

Se determinó que los cultivos producidos en invernaderos son los principales consumidores de agua extraída por bombeo de canales y cuerpos de agua. La razón de ello radica en que mantienen una cubierta impermeable que los hace dependientes del riego tecnificado, a diferencia de los cultivos de temporal que utilizan agua de lluvia.

Para cuantificar y localizar la distribución espacial de los invernaderos se procedió a la conformación de un Sistema de Información Geográfica. En este sistema se organizó y relacionó información procedente de INEGI y CONABIO, con fotografías aéreas de la zona, procedentes del portal Google Earth. Con la información cargada en el sistema, se procedió a digitalizar las poligonales de las chinampas productivas así como los invernaderos que se localizan dentro de la poligonal de estudio. Para la digitalización y posterior cuantificación de la superficie ocupada por invernaderos productivos se establecieron dos criterios.

El primer criterio consistió en la identificación y digitalización de los invernaderos localizados en las chinampas con alta presencia de viviendas, principalmente en los barrios de San Lorenzo, Caltongo, San Juan Moyotepec y San Luis Tlaxialtemalco (Figura 13). En

este caso se digitalizó únicamente la superficie ocupada por el invernadero, la cual es fácilmente identificable tanto por su forma como por el color del mismo.

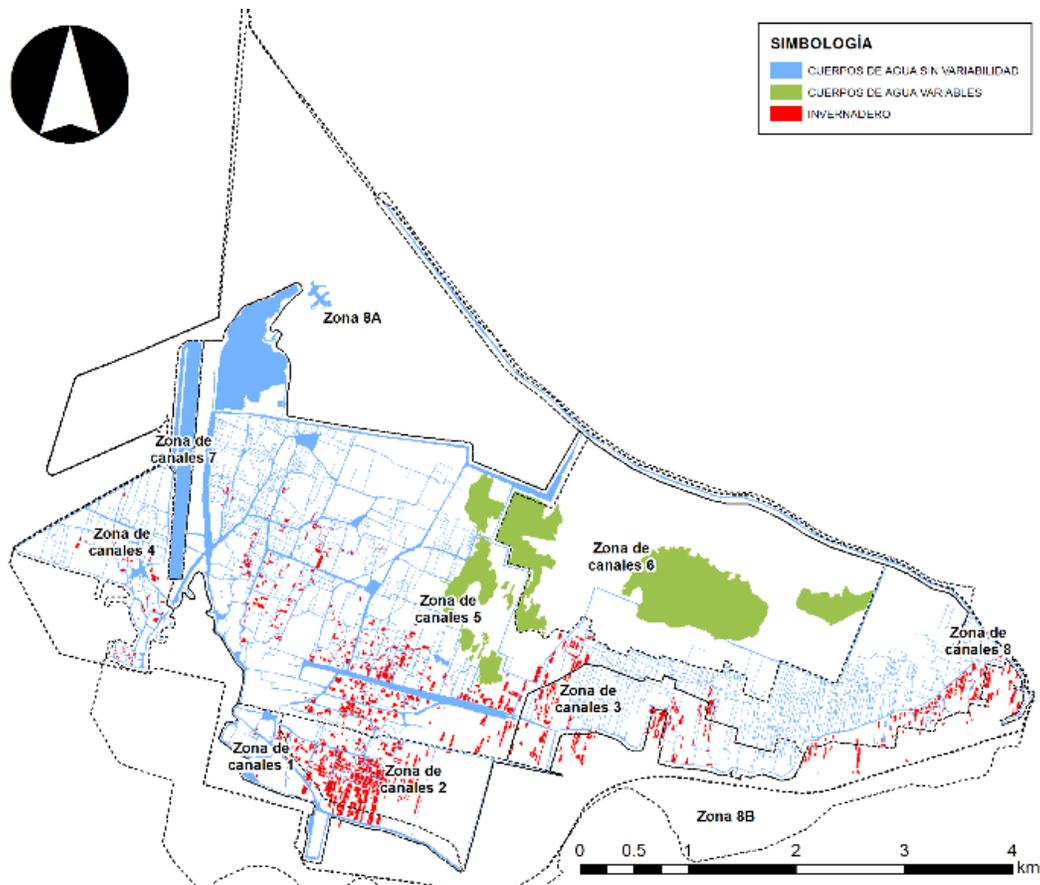


Figura 13. Estimación de superficie chinampera ocupada por invernaderos de manera puntual. Elaboración propia.

El segundo criterio fue la estimación a gran escala de la superficie ocupada por invernaderos al interior de las chinampas con nula o baja presencia de asentamientos humanos. Este método se empleó debido a que la alta concentración de invernaderos en el sitio permitía una cuantificación a partir de una estimación de porcentaje de ocupación de suelo (Figura 14).

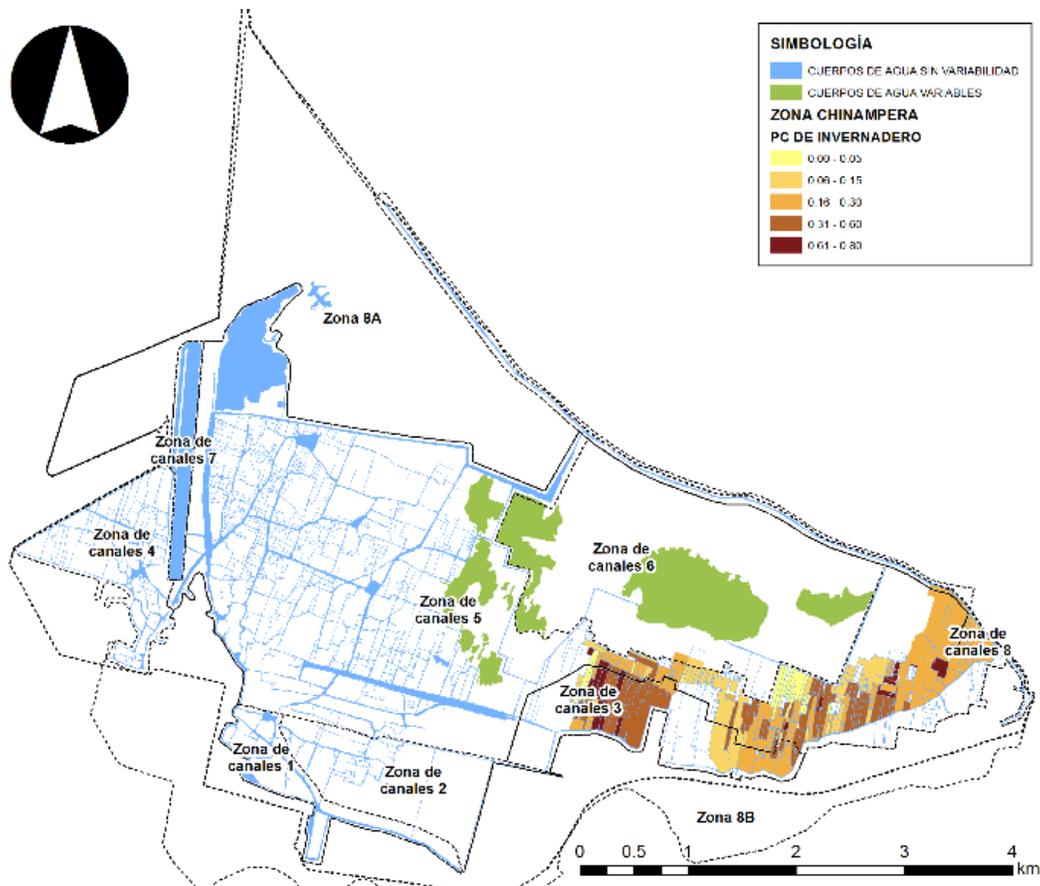


Figura 14. Estimación de superficie chinampera ocupada por invernaderos de manera zonal. Elaboración propia.

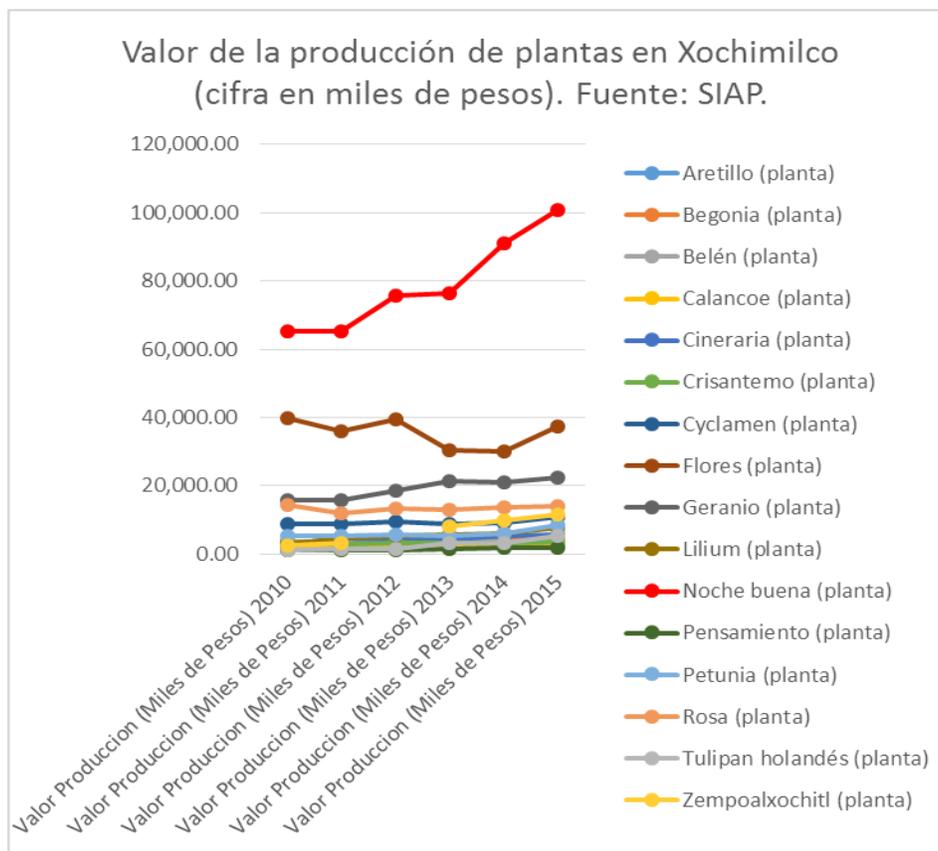
Con la utilización de este SIG, se logró estimar la superficie de invernaderos para producción agrícola, y así estimar el consumo de agua. Es importante aclarar que los dos criterios de estimación explicados anteriormente son complementarios y no excluyentes, por lo que la sumatoria de los resultados obtenidos por cada criterio, es equivalente al estimado total. En la Tabla 5, se muestran las superficies totales ocupadas por invernaderos en cada una de las 10 zonas que componen la poligonal de estudio. En la segunda columna (Sup. Invernadero (ha)) se muestran los totales obtenidos bajo la aplicación del primer criterio, mientras que en la tercer columna (Estimación Invernadero (ha)) se muestran los resultados obtenidos por el segundo criterio.

Tabla 5. Resultados de la estimación de superficie chinampera ocupada por invernaderos. Elaboración propia.

Zona	Cota de canales (m.s.n.m.)	Sup Invernadero (ha)	Estimación Invernadero (ha)	Total (ha)
Zona de canales 1	2,233.50	4.65	-	4.65
Zona de canales 2	2,232.00	21.81	-	21.81
Zona de canales 3	2,232.00	9.17	23.19	32.37
Zona de canales 4	2,231.50	2.11	-	2.11
Zona de canales 5	2,231.00	34.21	36.39	70.60
Zona de canales 6	2,230.50	-	-	-
Zona de canales 7	2,231.00	-	-	-
Zona de canales 8	2,231.50	-	2.16	2.16
Zona de canales 8A	2,231.00	-	-	-
Zona de canales 8B	N/A	8.79	-	8.79
Total		80.74	61.74	142.48

Se obtuvo una superficie total de 142.48 ha correspondientes a invernaderos de producción agrícola. Comparando estos resultados con datos del SIAP, que reportaba al año 2015 una superficie de 121 ha sembradas, la estimación aquí descrita resulta un 17% superior. De las 10 zonas en las que se encuentra subdividida la poligonal de estudio, siete tienen presencia de invernaderos de producción agrícola según el método aquí propuesto, que son las zonas: 1, 2, 3, 4, 5, 8 y 8B.

Por otro lado la diferencia de superficie de 21.48 ha, puede tener respuesta en el incremento de la rentabilidad del cultivo de plantas de Nochebuena reportado en los registros 2010 a 2015 (Gráfica 5). En dicha grafica se observa un incremento de 35 millones en dicho periodo de tiempo en la producción de Nochebuena, mientras que las imágenes digitalizadas están fechadas al mes de febrero de 2017.



Gráfica 5. Valor de la producción de plantas en Xochimilco. Fuente: SIAP.

Etapa 2. Identificación de los productos agrícolas producidos en la zona lacustre de Xochimilco.

Para estimar el consumo de agua que requiere la actividad agrícola en la zona lacustre de Xochimilco se utilizó información registrada del periodo 2010 a 2015 en el Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera, SIAP. Con esta herramienta fue posible identificar los principales productos agrícolas reportados, la superficie sembrada de cada uno de ellos, así como su rentabilidad económica y su precio medio rural.

Como se observa en la comparativa de la Tabla 6, organizada del cultivo de mayor superficie sembrada al de menor superficie, se tienen contabilizados 16 productos agrícolas, donde todas las especies se relacionan a plantas de ornato con destino a los mercados de flores y plantas.

Tabla 6. Superficie sembrada por cultivos reportados en el Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera 2010 - 2015.

No. Cultivo	Cultivo (Nombre común)	Sup. Sembrada (Ha) 2010	Sup. Sembrada (Ha) 2011	Sup. Sembrada (Ha) 2012	Sup. Sembrada (Ha) 2013	Sup. Sembrada (Ha) 2014	Sup. Sembrada (Ha) 2015	Sup. Sembrada (PC) 2015
1	Flores (planta)	34.95	34.5	34.95	22.15	20.6	22.46	18%
2	Noche buena (planta)	18.3	18	18.05	18	20.35	20.2	17%
3	Geranio (planta)	14.5	14	17.5	17.5	16.5	16.7	14%
4	Rosa (planta)	12.5	12	12	12	11.5	11.4	9%
5	Cempoalxochitl (planta)	2.5	5		7.5	8	9	7%
6	Petunia (planta)	6	5.8	5.9	6	5.9	7.2	6%
7	Cyclamen (planta)	6.1	6	6.2	6	5.8	6.4	5%
8	Cineraria (planta)	5.6	6	6.4	6.5	6.5	6.35	5%
9	Lilium (planta)	2.1	3.5	4	4.5	4.5	4.6	4%
10	Pensamiento (planta)	3	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3%
11	Calancoe (planta)	3	3.5	3.5	3.5	3.5	3.45	3%
12	Begonia (planta)	2.7	2.5	2.1	2.5	2.5	2.5	2%
13	Belén (planta)	2.8	2.5	2.5	2.5	2.3	2.4	2%
14	Aretillo (planta)	2.2	1.9	1.9	1.9	1.9	2	2%
15	Crisantemo (planta)	2.2	2	1.9	2	2.02	2	2%
16	Tulipan holandés (planta)	1	1	1	1	1	1.7	1%
Superficie total:		119.45	121.7	121.4	117.05	116.37	121.86	100%

De los 16 cultivos, la producción de flores (planta) representó para el año 2015 el 18% del total de la superficie sembrada, seguida del cultivo de plantas de Nochebuena con cerca del 17%, mientras que el Cempoalxochitl, la Rosa y el Geranio en conjunto el 30 %. El 35% restante de la superficie fue utilizada para el cultivo de plantas como: Aretillo, Begonia, Belén, Calancoe, Cineraria, Crisantemo, Cyclamen, Lilium, Pensamiento, Petunia y Tulipán.

Ante la imposibilidad de poder establecer los requerimientos de agua de cada cultivo, se determinó seleccionar los principales productos de la región y las características de riego de estas. En el siguiente apartado, se muestra la metodología utilizada para calcular los requerimientos de agua de las plantas, y obtener una media de consumo total por zona de agua destinado a riego.

Etapa 3. Estimación del consumo de agua para producción agrícola en invernadero, método de Blaney-Criddle.

La evapotranspiración o uso consuntivo (UC), es la cantidad de agua que un cultivo pierde por los efectos de la evaporación del suelo y el de transpiración de las plantas. De aquí se deduce que, como el agua es extraída del suelo, es necesario reponerla constantemente para

que el cultivo se desarrolle; “*El UC de un cultivo es la cantidad de agua (lámina de riego) que necesita un cultivo para su desarrollo normal*” (Gracia Sánchez, 2002).

Para calcular la lámina de riego necesaria para el desarrollo de los cultivos de referencia se utilizó el método de Blaney-Criddle, dado que es el más utilizado en México y por tanto el más probado (Gracia Sánchez, 2002). Este método requiere información de tres variables que son: datos de la temperatura media mensual, el porcentaje mensual de horas de luz natural y finalmente la duración del ciclo vegetativo del cultivo y sus respectivos coeficientes (K_c).

El ciclo vegetativo es el periodo de tiempo que comprende entre la siembra y la cosecha, y se subdivide comúnmente en: germinación, crecimiento, floración y madurez. Donde la duración de cada periodo depende del tipo de cultivo (Gracia Sánchez, 2002). A lo largo del desarrollo de las plantas sus características y necesidades de agua van cambiando, por lo cual existe una variación en el coeficiente de cultivo K_c . Dicha variación se representa por la curva de coeficiente de cultivo (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 2006) Figura 15.

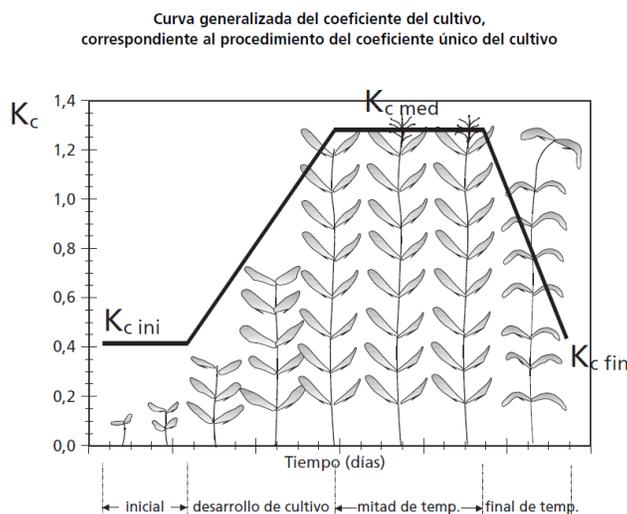


Figura 15. Curva generalizada de la variación del coeficiente de cultivo a lo largo del desarrollo de la planta (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 2006).

Como se observa en la Figura 15, el pico en el K_c se localiza al término del periodo de desarrollo de la planta, identificado como $K_{c\text{ med}}$. Para el caso de Xochimilco, la mayoría de los productos cultivados son plantas de ornato, las cuales en su mayoría se mantienen en etapas de crecimiento y floración, que corresponde con el periodo de $K_{c\text{ med}}$. Por lo tanto, los

valores de K_c utilizados en este ejercicio para calcular la lámina de riego requerida será la media de manera permanente a lo largo del año.

Los resultados del método de Blaney-Criddle son láminas de riego, representadas como unidades de columnas de agua en cm/mes, cantidad que posteriormente se distribuye a lo largo del mes para mantener un riego acorde a las necesidades diarias.

La ecuación propuesta en el método de Blaney-Criddle es la siguiente (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 2006):

$$UC = \sum_{i=1}^N Kc_i P_i \left(\frac{t + 17.8}{21.8} \right)_i$$

Donde:

UC Uso consuntivo mensual, en cm

P_i Porcentaje de horas mensuales de luz

t Temperatura media mensual, en °C

Kc Coeficiente de cultivo (mensual)

i Índice para cada uno de los meses del ciclo vegetativo. 1 para la siembra y N para la cosecha.

Determinación del coeficiente de cultivo K_c .

Para la estimación del requerimiento de agua se determinó la utilización de un K_c promedio. En la bibliografía consultada no fue posible identificar los coeficientes de cultivo específicos para las plantas cultivadas en la zona lacustre de Xochimilco reportadas en el SIAP. Por tal motivo, se recurrió al manual de Evapotranspiración del cultivo, publicado por la Food and Agriculture Organization (FAO por sus siglas en inglés), del cual se seleccionaron un total de seis plantas con características similares que son Girasol, Fresa, Ajonjolí, Pasto ornamental, Palmas y vegetación pequeña. De dichas plantas se tomaron los coeficientes de cultivo medios ($K_{c_{med}}$), los cuales corresponden a las demandas de agua en el punto de desarrollo máximo de estas. Se obtuvieron los valores promedio de K_c , el cual será utilizado para estimar el consumo de agua (Tabla 7).

Tabla 7. Coeficientes de cultivo (K_{cmed}) para flores y plantas pequeñas. Fuente: (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 2006).

Planta seleccionada	K_c Med
Girasol	1.15
Fresas	0.85
Ajonjolí	1.10
Pasto ornamental	0.95
Palmas	1.00
Vegetación pequeña	1.10
Promedio:	1.03

Resultados de uso consuntivo de agua. (Método de Blaney y Criddle).

Con el método de Blaney-Criddle se calcularon los valores del uso consuntivo (UC) utilizando el valor de K_{cmed} promedio de 1.03 (Tabla 7). Los resultados de UC se encuentran en unidades de cm/mes de columna de agua y corresponden a las necesidades cambiantes de agua de las plantas a lo largo de su desarrollo. Como se muestra en la Tabla 8 los resultados de UC son variables en función de la época del año, incrementándose hasta un 60% en los meses de mayores temperaturas y alta incidencia solar. Relacionando estos resultados con los meses en los que la zona lacustre experimenta el mayor estrés hídrico (marzo, abril y mayo).

Tabla 8. Uso consuntivo mensual para flores y plantas pequeñas. Método de Blaney-Criddle, elaboración propia.

Mes	Porcentaje horas de luz (P_i)	Temperatura media (t_i) (°C)	UC (cm/mes)	UC (mm/mes)	UC diario promedio por mes (mm/día)
Enero	7.79	6.3	8.83	88.27	2.94
Febrero	7.29	7.1	8.53	85.35	2.84
Marzo	8.41	9.9	10.95	109.53	3.65
Abril	8.51	12.3	12.04	120.44	4.01
Mayo	9.11	13.9	13.58	135.78	4.53
Junio	8.97	14.6	13.66	136.65	4.55
Julio	9.2	13.7	13.63	136.26	4.54
Agosto	8.92	13.5	13.13	131.27	4.38
Septiembre	8.28	13.6	12.22	122.24	4.07
Octubre	8.19	11.8	11.40	113.98	3.80
Noviembre	7.63	9.4	9.76	97.58	3.25
Diciembre	7.71	7.5	9.17	91.72	3.06
Total anual			136.908	1,369.08	

Resultados del consumo bimestral de agua para riego agrícola.

Se estima que las siete zonas con presencia de invernaderos agrícolas consumen anualmente un total de 1, 950,678 m³ de agua. A continuación en la Tabla 9 se presentan los valores de consumo de agua de las siete zonas organizados de manera bimestral. Como se describió en la metodología, estos valores son el resultado de cruzar la superficie total de invernaderos de cada una de las siete zonas (Unidades en m²) por los valores de uso consultivo mensual promedio calculados en el apartado anterior. Los consumos bimestrales de cada zona están dadas en metros cúbicos de agua.

Tabla 9. Uso consultivo bimestral. Método de Blaney-Criddle. Elaboración propia.

Estimación de UC. Consumo de agua por zona de canales, (m ³ /bimestre).									
Bimestre	UC (cm/bimestre)	Zona 1 (m ³)	Zona 2 (m ³)	Zona 3 (m ³)	Zona 4 (m ³)	Zona 5 (m ³)	Zona 8 (m ³)	Zona 8B (m ³)	Total (m ³ /bimestre)
Enero - Febrero	17.36	8,074	37,869	56,194	3,664	122,578	3,742	15,254	247,376
Marzo - Abril	23.00	10,695	50,160	74,433	4,853	162,362	4,956	20,205	327,665
Mayo - Junio	27.24	12,670	59,421	88,175	5,749	192,340	5,871	23,936	388,163
Julio - Agosto	26.75	12,442	58,353	86,590	5,646	188,882	5,766	23,506	381,183
Septiembre - Octubre	23.62	10,986	51,525	76,458	4,985	166,780	5,091	20,755	336,580
Noviembre - Diciembre	18.93	8,803	41,288	61,268	3,995	133,645	4,080	16,632	269,710
Total anual (m³/año)		63,671	298,615	443,117	28,893	966,587	29,506	120,289	1,950,678

La información se organizó y presenta de manera bimestral y no mensual, por el hecho de que las tarifas correspondientes a los servicios de distribución de agua se facturan de manera bimestral, según el artículo 172 del Código Fiscal de la Ciudad de México. Homogenizando los consumos con la forma de cobro de otras fuentes alterna de agua, es posible estimar el valor por costo de reemplazo del agua de riego tomada de canales y cuerpos de agua de la zona lacustre.

Etapa 4. Estimación del costo de reemplazo del agua de los canales por fuentes alternas.

El “método de costo de reemplazo” parte de la premisa de que existen bienes sustitutos de los servicios ambientales que cuentan con un mercado y a partir de los cuales se puede estimar el valor del servicio ambiental en cuestión (Balvanera, et al., 2011).

Se tomaron los consumos de agua bimestral para el riego de plantas en invernadero, calculados en el apartado anterior, para conocer el valor de costo de reemplazo del agua presente en canales y cuerpos de agua, tomando como referente el costo de fuentes alternas que son: agua para uso humano distribuida en red, agua distribuida en camión cisterna, agua residual tratada a nivel secundario (ART2), y agua residual tratada a nivel terciario (ART3).

Las tarifas por el consumo de estas cuatro fuentes alternas se tomaron del Código Fiscal del Distrito Federal, en particular de los artículos 172 y 173, con fecha del 29 de diciembre de 2016. En el artículo 172 de dicho Código, se establece que el pago por los derechos de suministro se efectuara bimestralmente por toma de agua de acuerdo con la medición y tarifa correspondiente. Cabe aclarar que las tarifas referentes a las cuatro fuentes alternas, se consideran sin subsidios y para usos no domésticos.

Tarifa de agua potable sin subsidio para uso no doméstico, distribuida en red.

En el artículo 172 fracción III de dicho Código, se establece la tarifa por los derechos de suministro de agua sin subsidio, para usos no domésticos (Tabla 10).

Tabla 10. Tarifa por el suministro de agua potable en red sin subsidio. Fuente: Código Fiscal del Distrito Federal del 29 de diciembre del año 2016.

Fracción III. Tarifa para uso no doméstico, sin subsidio					
Consumo en litros			Tarifa		
Límite inferior	Límite Superior		Cuota mínima		Cuota adicional cada 1,000 litros excedentes al límite inferior
0	10,000	\$	448.00	\$	-
10,000	20,000	\$	448.00	\$	29.87
20,000	30,000	\$	746.64	\$	45.45
30,000	50,000	\$	1,201.13	\$	45.45
50,000	70,000	\$	2,110.10	\$	45.45
70,000	90,000	\$	3,019.05	\$	48.05
90,000	120,000	\$	3,979.95	\$	53.24
120,000	Más	\$	5,577.35	\$	81.81

a) Tarifa de agua potable sin subsidio para uso no doméstico, distribuida en camión cisterna.

En el artículo 173 fracción I, se establece la tarifa cuando la distribución del agua potable se realice en camión cisterna, Tabla 11.

b) Tarifas de agua residual tratada sin subsidio para uso no doméstico, distribuida en red.

En el artículo 173 fracciones III y IV, se establecen las tarifas por el consumo de agua residual tratada de nivel secundario y terciario respectivamente, considerando que existe una toma con medidor dentro del inmueble, tabla 11.

Tabla 11. Tarifa por el suministro de agua potable en camión cisterna, suministro de agua residual tratada de nivel secundario y terciario. Fuente: Código fiscal del Distrito Federal del 29 de diciembre del año 2016.

Fracción I. Tarifa de agua potable en camión cisterna	
Cuota única: \$	99.34 m ³
Fracción III. Agua residual tratada nivel secundario	
Toma y medidor en el inmueble: \$	35.55 m ³
Fracción IV. Agua residual tratada nivel terciario	
Toma y medidor en el inmueble: \$	50.53 m ³

2.3.4 Análisis de resultados.

Las estimaciones del valor del recurso hídrico, bajo la metodología de costo de reemplazo, se realizaron de la siguiente manera: volumen total (m³) consumido en el riego agrícola, el cual es transformado a valor monetario, tomando como base las tarifas vigentes contenidas en el Código Fiscal de la Ciudad de México. Cabe aclarar que para el caso de la Ciudad de México, la tarifa que se cobra por el agua potable únicamente contempla el servicio de distribución y abastecimiento por parte del Sistema de Agua de la Ciudad de México, y no se cobra por el líquido, ni se considera su calidad.

Reemplazar la fuente de riego actual (extracción de agua de canales con bombeo) por las fuentes alternas aquí propuestas representa gastos anuales por encima de los 69 millones. Si los agricultores de la zona lacustres se vieran en la necesidad de recurrir a la red de agua

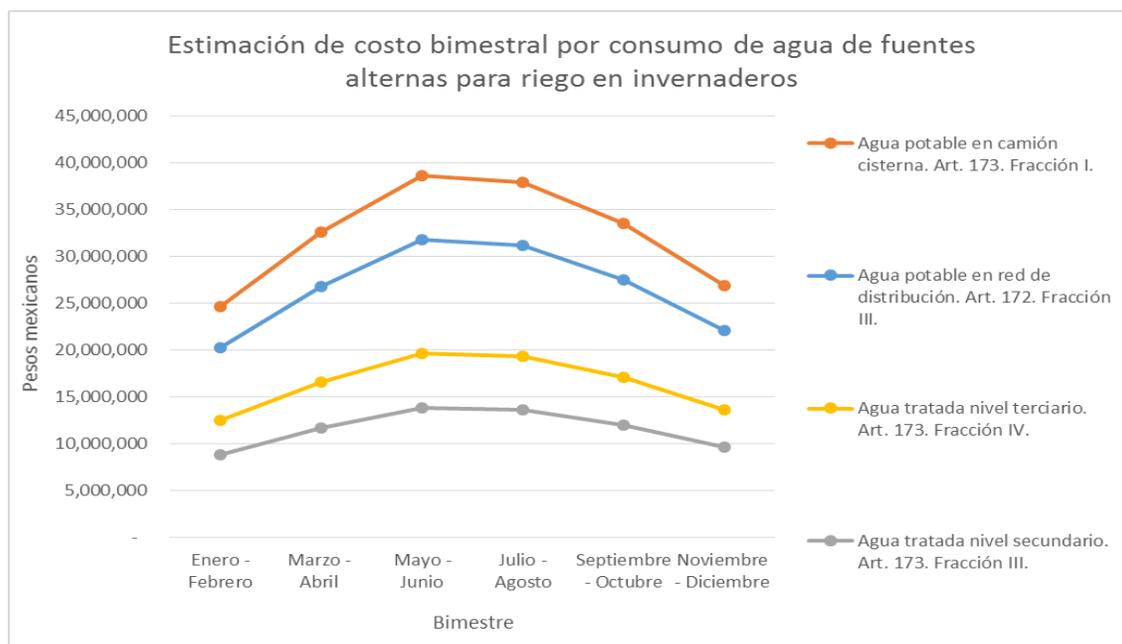
potable, les representaría un gasto anual de \$159.4 millones de pesos. Mientras que consumir agua potable distribuida en camión cisterna equivale a \$193.8 millones al año (Tabla 12), sin considerar el daño ambiental generado por la emisión de contaminantes que generaría la operación de cerca de 535 pipas diariamente para abastecer los cerca de 5,344 m³ de agua que consume la agricultura diariamente (volumen estimado).

Para el caso de consumir ART directamente de una red de distribución con toma y medidor en el inmueble, representaría un gasto de \$69.3 millones de pesos en calidad secundaria y un monto de \$98.6 millones de pesos en calidad terciaria (Tabla 12).

Tabla 12. Estimación de costo bimestral por consumo de agua de fuentes alternas para riego en invernaderos. Elaboración propia.

Costo por consumo de agua por fuentes alternas.

Bimestre	Consumo total de agua (m3/bimestre)	Agua potable en red de distribución. Art. 172. Fracción III.	Agua potable en camión cisterna. Art. 173. Fracción I.	Agua tratada nivel secundario. Art. 173. Fracción III.	Agua tratada nivel terciario. Art. 173. Fracción IV.
Enero - Febrero	247,375.75	\$20,208,131	\$24,574,307	\$8,794,208	\$12,499,896
Marzo - Abril	327,664.67	\$26,776,568	\$32,550,208	\$11,648,479	\$16,556,896
Mayo - Junio	388,163.40	\$31,725,969	\$38,560,152	\$13,799,209	\$19,613,897
Julio - Agosto	381,183.47	\$31,154,941	\$37,866,766	\$13,551,073	\$19,261,201
Septiembre - Octubre	336,580.01	\$27,505,931	\$33,435,858	\$11,965,419	\$17,007,388
Noviembre - Diciembre	269,710.31	\$22,035,321	\$26,793,022	\$9,588,201	\$13,628,462
Total anual:	1,950,677.61	\$159,406,861	\$193,780,313	\$69,346,589	\$98,567,739



Gráfica 6. Evolución a lo largo del año del costo bimestral por consumo de agua de fuentes alternas para riego en invernaderos. Elaboración propia.

Según datos del SIAP, el valor total de la producción de plantas en Xochimilco, para 2015 fue de \$243 millones, por lo que de no existir el aporte de agua residual tratada, los agricultores de la zona lacustre tendrían que destinar desde el 29% hasta el 80% de sus ingresos al pago de agua (Tabla 13).

Tabla 13. Porcentaje por el pago de fuentes alternas del valor total de la producción de plantas en Xochimilco. Elaboración propia con datos del SIAP, SAGARPA 2015.

Tipo de fuente	Costo por consumo de agua por fuentes alternas.	Porcentaje del valor total de la producción de plantas en Xochimilco al año 2015
Agua potable en red de distribución.	\$159,406,861.25	66%
Agua potable en camión cisterna.	\$193,780,313.39	80%
Agua tratada nivel secundario.	\$69,346,588.90	29%
Agua tratada nivel terciario.	\$98,567,739.44	41%

La valoración económica del recurso hídrico se estimó utilizando la alternativa más económica, que en este caso es el agua tratada de nivel secundario, que representa un monto de \$69.3 millones de pesos al año. Bajo la lógica que los agricultores buscarían remplazar la fuente original por la alternativa más económica disponible.

2.4 Estimación del valor económico del agua superficial a partir de la actividad turística “Paseo en trajinera” presente en la zona de canales de Xochimilco. *Utilización de valoración directa del mercado de turismo en trajinera.*

La segunda propuesta presentada para estimar el valor que representa la entrega de Agua Residual Tratada (ART) a la zona lacustre, se estructuró bajo la metodología de valoración directa. Ésta busca estimar el valor de uso de un servicio ambiental en función del valor de mercado que tiene la actividad económica que se desarrolla gracias a la existencia de dicho recurso. Esto es los beneficios económicos que un grupo determinado de población obtiene por la existencia del mismo.

Para el caso del presente trabajo, los remeros de las trajineras se pueden considerar como la población beneficiada, debido a la existencia y continuidad de la zona lacustre de Xochimilco. Sin embargo, por cuestiones metodológicas, se planteó que el valor de uso del recurso está en función de los ingresos que perciben gracias al desarrollo de su actividad, sin el cual, se verían afectadas las fuentes de empleo. Asimismo, por cuestiones de índole social, resulta contradictorio preguntar a la población por la disponibilidad a pagar por el aporte de ART, cuando la existencia de la PTAR Cerro de la Estrella surgió para resarcir el daño que la Ciudad de México le causó a la zona lacustre de Xochimilco y a su población en la década de 1970.

Por lo tanto, el marco metodológico aquí desarrollado, toma como base la valoración directa de la actividad turística del paseo en trajinera, dado que existe un mercado que puede ser valorado. Considerando que gracias a la existencia de los aportes de ART, se puede continuar desarrollando dicha actividad turística. Por lo tanto, el valor del ART es equiparable a la afectación económica que puede llegar a sufrir la actividad turística (paseo en trajinera) si el sistema lacustre decae, perdiendo además, la inversión realizada en la construcción de embarcaderos y trajineras.

La valoración se estimó de manera anual, para poder ser equiparable y comparable con los registros presupuestales de operación y mantenimiento de las PTARs vinculadas a la zona lacustre, principalmente con la de Cerro de la Estrella, encargada de aportar aproximadamente el 90% de dicho volumen. Asimismo, la estimación anual ayuda a conocer el comportamiento de la demanda de turistas a lo largo del año, donde la temporalidad si influye en los ingresos reportados.

Cabe aclarar que la metodología propuesta se enfoca únicamente a valorar dicha actividad, y no contempla las actividades derivadas complementarias como son la venta de alimentos, bebidas, artesanías, música, etc. No obstante queda la posibilidad para futuros trabajos de investigación, analizar en conjunto todas las actividades económicas relacionadas con el paseo turístico en trajinera y de estimar el valor cultural de esta actividad. De realizarse, el valor estimado total sería mucho mayor a los gastos de operación de las PTARs, justificándose ampliamente el argumento planteado en la presente tesis.

2.4.1 Objetivo.

Conocer el valor económico del recurso hídrico artificial en función de los precios de mercado de la actividad turística conocida como *Paseo en Trajinera*, utilizando la metodología de *valoración directa*.

2.4.2 Metodología de valoración directa.

La metodología se divide en tres etapas: identificación de embarcaderos y trajineras, diseño y aplicación de la encuesta con el análisis de los resultados y, por último, estimar los ingresos que perciben los remeros por el desarrollo de su actividad.

Etapa 1. Mapeo y ubicación de embarcaderos y cuantificación de trajineras para poder conocer la distribución de estos elementos a lo largo del territorio de la zona lacustre de Xochimilco.

Etapa 2. Diseño y aplicación de encuesta enfocada a conocer las características del mercado del paseo turístico en trajinera. Conocer los ingresos que genera la actividad turística, así como los costos de operación asociados a ésta. En la encuesta se incluyó un apartado destinado a conocer el comportamiento o la frecuencia de turistas a lo largo del año.

Etapa 3. Finalmente se realizó el análisis de los resultados de las encuestas. Se busca describir las características de operación de la actividad turística del paseo en trajinera. Asimismo se realiza la estimación de los ingresos percibidos por su realización tomando como base los precios de mercado de la hora de paseo. Con estos resultados se hace una aproximación al valor del recurso hídrico artificial bajo la metodología de valoración directa.

2.4.3 Aplicación de metodología a la actividad turística de paseo en trajinera.

Etapa 1. Identificación espacial de embarcaderos y trajineras.

Se mapeó la ubicación de los diez embarcaderos en los cuales se concentran las trajineras destinadas a prestar el servicio turístico de paseo en trajinera. En éstos se distribuyen 1005 trajineras. Este mapeo se utilizó para la organización del levantamiento de encuestas, con el objetivo de que su distribución fuera equitativa a lo largo del territorio, y con ello tener una

visión lo más extensa posible del comportamiento de dicho sector económico. Como se muestra en la Figura 16, la distribución de los embarcaderos no es homogéneo a lo largo de la zona lacustre, concentrándose principalmente al sur poniente de la poligonal.

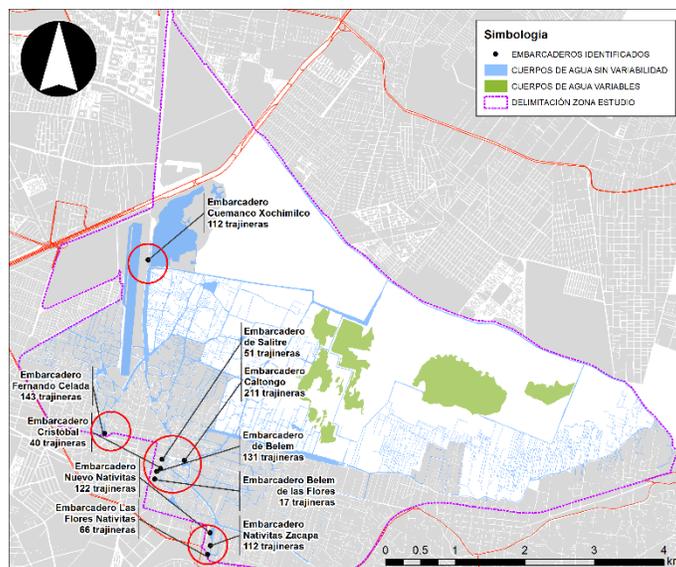


Figura 16. Ubicación de los 10 embarcaderos localizados en la zona lacustre de Xochimilco, Elaboración propia.

Asimismo se identifican 4 puntos en los cuales se agrupan los embarcaderos y trajineras, dos de ellos cercanos a la cabecera de la delegación Xochimilco, embarcadero Fernando Celada y la agrupación de los Embarcaderos de Belem-Caltongo. En el extremo sur poniente de la poligonal, se agrupan los embarcaderos de Nativitas-Zacapa, y al norte el embarcadero de Cuemanco Xochimilco.

Etap 2. Descripción y aplicación de la encuesta aplicada para valorar el mercado de la actividad económica “paseo en trajinera”.

La encuesta tiene como objetivo recabar información sobre la operación de las trajineras en Xochimilco, conocer los ingresos que generan, los gastos de operación y la afluencia de turistas a lo largo del año. Se compone de ocho preguntas distribuidas en dos apartados. El primer bloque busca conocer el costo de adquisición y mantenimiento de la trajinera, así como el tiempo de vida útil de la misa. El segundo bloque, se diseñó con la intención de estimar el ingreso total anual por dicha actividad, así como conocer la afluencia de turistas a lo largo del año. A continuación, se presenta la encuesta tipo (Figura 17) y una descripción de cada pregunta.

Nombre del embarcadero: _____

Cuestionario para los prestadores de servicios turísticos.
 Ocupación: Operador de Trajinera

1. Antigüedad como prestador de servicio turístico.
 Indique el número de años

2. Conoce el costo de compra de una trajinera.
 Indique el costo en pesos

3. Tiempo de vida útil de la trajinera (antes de tener que renovarla).
 Años

4. Gasto de mantenimiento y periodicidad. Mensual \$/mes
 Anual \$/año

5. Días en los que trabaja con regularidad

	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado	Domingo
Indique con una "x" los días que labora	<input type="checkbox"/>						
1 hora o menos	<input type="checkbox"/>						
1 a 3 horas	<input type="checkbox"/>						
3 a 5 horas	<input type="checkbox"/>						
5 a 7 horas	<input type="checkbox"/>						
Más de 7 horas	<input type="checkbox"/>						

6. Horas por día que trabaja con regularidad

7. Indique la afluencia de turistas por mes

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Alta afluencia	<input type="checkbox"/>											
Demanda promedio	<input type="checkbox"/>											
Baja afluencia	<input type="checkbox"/>											

8. Tarifa promedio por hora de recorrido (marque con "x" el rango en el que se ubica).

<input type="checkbox"/> 0 a 100 \$/hr	<input type="checkbox"/> 100 a 200 \$/hr	<input type="checkbox"/> 200 a 300 \$/hr	<input type="checkbox"/> 300 a 400 \$/hr	<input type="checkbox"/> Más de 400 \$/hr
--	--	--	--	---

Figura 17. Encuesta tipo para aplicación a los prestadores de servicios turísticos, Elaboración propia.

El formato de la encuesta es de preguntas cerradas, en las cuales se le pidió al entrevistado que responda de forma cuantitativa, por lo que fue necesario explicarle previamente dicho formato. La pregunta uno tiene por objetivo ser el filtro para continuar la entrevista o descartar al entrevistado. Se estableció como antigüedad mínima un año prestando el servicio para poder establecer que el remero conoce el comportamiento anual de dicha actividad. De manera que a mayor antigüedad es mayor el grado de conocimiento y la experiencia sobre las condiciones que involucran a la actividad turística.

Las preguntas dos, tres y cuatro están encaminadas a calcular el costo de reemplazo de la trajinera y descartar dicho monto de los ingresos percibidos, por lo que se cuestionó a los encuestados si conocen el valor de adquirir una trajinera nueva y el tiempo de vida útil de

ésta. La pregunta cuatro tiene como finalidad conocer el costo de manteniendo mensual/anual de la trajinera para descartarlo como un ingreso.

Las preguntas cinco y seis buscan establecer el patrón de afluencia semanal y con ello determinar las horas trabajadas. La tarifa que se cobra por la prestación del servicio es fija en todos los embarcaderos y representa un monto de \$350/hora, tomada a mes de junio del año 2017, por lo que la pregunta ocho quedó invalidada. Preguntando tanto los días laborados como el total de horas se puede inferir el monto total generado por semana, así como las horas promedio trabajadas por día.

La pregunta siete indaga el patrón de afluencia de turistas a lo largo del año. Se pidió a los remeros indicar, en porcentaje, cómo percibían la afluencia de gente a lo largo del año de manera mensual. El 100% representa el mes con la más alta afluencia y un 10% baja o nula. Estos resultados fueron de utilidad para calcular los ingresos anuales que perciben.

Aplicación de encuesta a los operadores de trajineras.

Se determinó realizar un muestreo del 5% del total de 1,005 embarcaciones presentes en la zona lacustre destinadas a prestar el servicio de paseo en trajinera. Por lo que se estimaron un total de 50 encuestas, con un grado de error del 11.34% y un nivel de confianza del 90%. Como se observa en la Tabla 12, se tiene registro de 10 embarcaderos en los que se distribuyen las 1,005 embarcaciones. La distribución de las embarcaciones no es homogénea entre los 10 embarcaderos, destacándose el Embarcadero de Caltongo por poseer casi el 20% de embarcaciones, con 211 trajineras. El embarcadero de Belem las Flores, en caso contrario cuenta con 17 trajineras (1.6%).

Se dividieron las 50 encuestas de manera proporcional entre los 10 embarcaderos en función del número de trajineras censadas como se muestra en la Tabla 14.

Tabla 14. Número de trajineras por embarcadero. Repartición proporcional de las 50 encuestas muestra, Elaboración propia.

No.	Embarcadero	Trajineras censadas	Porcentaje de trajineras por embarcadero	Repartición proporcional encuestas
1	Caltongo	211	21%	9
2	Fernando Celada	143	14%	7
3	Belem	131	13%	7
4	Nuevo Nativitas	122	12%	6
5	Cuemanco	112	11%	6
6	Nativitas Zacapa	112	11%	6
7	Flores	66	7%	3
8	Salitre	51	5%	3
9	Cristóbal	40	4%	2
10	Belem Flores	17	2%	1
Total		1005	100%	50

El levantamiento de las encuestas se realizó durante el mes de junio del año 2017. Se inició con la intención de aplicar 50 encuestas que representaban el 5% del total, sin embargo se aplicaron únicamente 41, representando el 4% del total de trajineras. Esto debido a que se registra un fenómeno de alta rotación en los remeros más jóvenes, no cumpliendo en su mayoría una antigüedad mínima de un año prestando el servicio, requisito indispensable para el llenado total de la encuesta. Asimismo no fue posible recabar información en los embarcaderos de Salitre y Cristóbal.

Etapa 3.A. Análisis de resultados generales.

Con los resultados de las 41 encuestas aplicadas a los remeros de ocho de los 10 embarcaderos de la zona lacustre de Xochimilco, se obtuvieron las siguientes conclusiones generales:

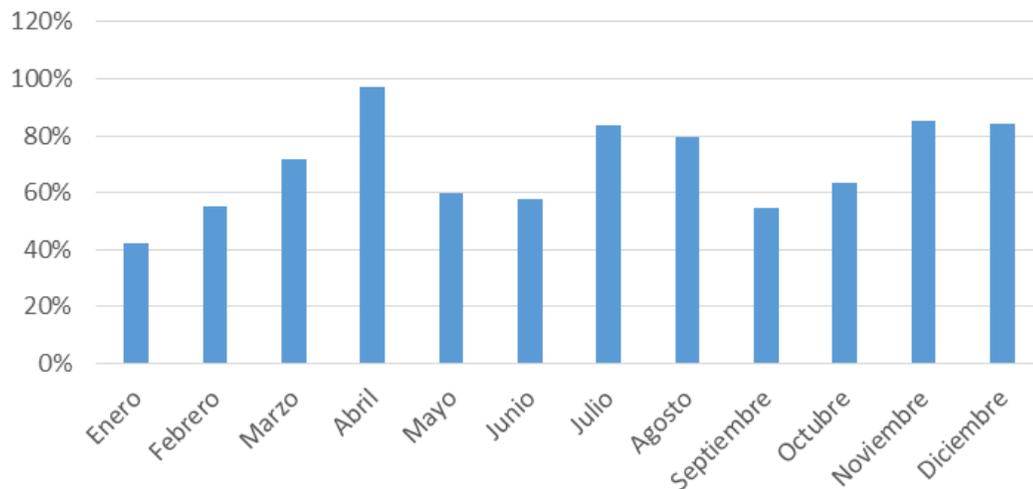
- La antigüedad promedio reportada se ubica en los 23 años, se observó que a mayor antigüedad mejor era su conocimiento sobre las características de la actividad.
- La demanda de visitantes se concentra en los fines de semana (comprendiendo de viernes, sábado y domingo), en los cuales el 100% de los remeros reportó laborar, frente a porcentajes menores al 50% para los primeros tres días de la semana (lunes, martes y miércoles) (Tabla 15). Si bien la encuesta no busca catalogar el tipo de turista

entre nacionales y extranjeros, los remeros comentaron que los turistas extranjeros visitan la zona lacustre de lunes a viernes en su mayoría, mientras que los turistas nacionales lo hacen frecuentemente de viernes a domingo.

Tabla 15. Distribución de la afluencia de turistas en una semana tipo. Elaboración propia con resultado de encuestas, junio de 2017.



- De igual forma, el comportamiento de la demanda a lo largo del año no es homogéneo. Se observan tres periodos con alta afluencia, destacando el mes de abril como el referente en afluencia de turistas, seguido de los meses de julio, agosto, noviembre y diciembre. Los resultados indican que enero es el mes con la menor afluencia de turistas para esta actividad.



Gráfica 6. Comportamiento de la afluencia de turistas a lo largo del año. Elaboración propia con resultados de encuestas, junio 2017.

Etapa 3.B. Estimación del ingreso generado por el servicio de paseo en trajinera.

Con los resultados de las 41 encuestas, contestadas en su mayoría por personas con una antigüedad en el oficio promedio de 23 años, se obtuvieron los siguientes resultados generales. Todos los datos siguientes son calculados a junio del año 2017.

- El costo promedio de adquisición de una trajinera es de \$67,115.38, con una desviación estándar de \$20,300.00. Esta variación, mencionan los entrevistados, tiene que ver con las dimensiones de cada trajinera, variando en función del número de usuarios que pueden transportar.
- El tiempo de vida útil es de aproximadamente 7.9 años, con una desviación estándar de 3.2 años. Su utilidad varía en función del mantenimiento dado en particular a cada embarcación, extendiendo su vida útil hasta los 11 años.
- El costo de mantenimiento promedio anual de las trajineras es de \$6,896.00. De igual forma, existe una desviación estándar de \$4,241.00, considerando la edad de la embarcación como un factor determinante. En los primeros años, el costo de mantenimiento es bajo mientras que al final de su vida útil el reemplazo de partes representa un alto costo. Cabe resaltar que se trata de embarcaciones construidas con materiales perecederos como la madera y ornamentos de paja que se sufren deterioro provocado por la exposición ambiental.

Estimación del valor de mercado de la actividad turística.

Finalmente con los datos recabados en las encuestas se realizó la estimación del valor del mercado del paseo turístico en trajinera. Se estableció el valor de mercado como el equivalente al ingreso neto que perciben los remeros por la prestación del servicio, estimándose de la siguiente manera:

Ingreso neto = Ingreso bruto – Gastos de reposición y mantenimiento

Para calcular el ingreso bruto, lo primero que se realizó fue estimar el número de horas mensuales laboradas, las cuales son variables a lo largo del año dependiendo de la afluencia de turistas, como se observó en la Gráfica 7.

- El número de horas mensuales promedio se estimó de la siguiente manera:

$$Hm = \sum_{i=1}^N M_i * \left(\frac{(Hr) * \left(\frac{52}{12}\right)}{Mr} \right)_i$$

Donde:

Hm = Estimado de horas por mes

Hr = Horas laboradas por semana (resultado de la encuesta)

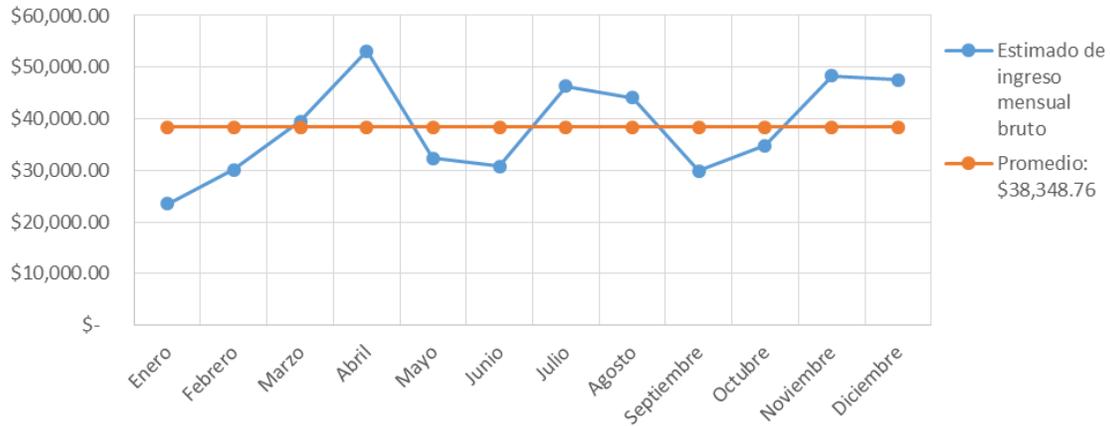
Mr = Afluencia de turistas en el mes de referencia (junio 2017)

M_i = Afluencia de turistas por mes

Con el número estimado de horas laboradas por mes, se calculó el ingreso bruto obtenido por desempeñar la actividad turística, de manera mensual como anual, quedando de la siguiente manera, (Tabla 16, Gráfica 7):

Tabla 16. Estimación de ingreso bruto mensual promedio calculado con tarifa de \$350/hr vigente al mes de junio 2017. Elaboración propia.

Mes	Estimado de horas laboradas por mes	Ingreso bruto (\$/mes) (tarifa \$350/hr)
Enero	67	\$23,483
Febrero	86	\$30,109
Marzo	113	\$39,528
Abril	152	\$53,153
Mayo	92	\$32,321
Junio	88	\$30,750
Julio	132	\$46,312
Agosto	126	\$44,028
Septiembre	85	\$29,916
Octubre	99	\$34,760
Noviembre	138	\$48,322
Diciembre	136	\$47,503
Total anual	1,314.81	\$460,185
Promedio mensual:	110	\$38,349



Gráfica 7. Estimación de ingreso bruto mensual calculado con tarifa de \$350/hr vigente al mes de junio 2017. Elaboración propia.

- El cálculo del gasto de mantenimiento y reposición de la trajinera se estimó de la siguiente manera:

$$GMR = \left(\frac{Ct/Vu}{12} \right) + \left(\frac{Ga}{12} \right)$$

Donde:

GMR = Gasto mensual de mantenimiento y reposición de trajinera

Ct = Costo total de la trajinera

Vu = Vida útil de la trajinera

Ga = Gasto de mantenimiento anual

En la encuesta se recolectó información sobre el costo de adquisición de una trajinera así como el periodo de vida útil que tienen antes de que sea necesario reponer. Además, se recopiló el gasto promedio anual que involucra el mantenimiento de la embarcación y los accesorios. El gasto de mantenimiento y reposición se calculó de manera mensual para poder ser restado del estimado de ingreso mensual bruto. De esta forma, se obtuvo una estimación promedio del ingreso mensual neto.

Posteriormente al estimado de ingreso bruto mensual se le descontaron los gastos que involucran tanto el mantenimiento como la reposición de una trajinera al final de su vida útil para obtener el ingreso neto (Tabla 17).

- La estimación del ingreso neto mensual se obtuvo de la siguiente manera:

$$IN = IB - GMR$$

Donde:

IN= Ingreso neto

IB= Ingreso bruto

GMR= Gasto mensual de mantenimiento y reposición de trajinera

Tabla 17. Estimación de ingreso neto mensual promedio calculado con tarifa de \$350/hr vigente al mes de junio 2017. Elaboración propia.

Mes	Ingreso bruto (\$/mes)	Gasto de mantenimiento y reposición promedio	Ingreso neto (\$/mes)
Enero	\$23,483	\$1,416	\$22,067
Febrero	\$30,109	\$1,416	\$28,693
Marzo	\$39,528	\$1,416	\$38,112
Abril	\$53,153	\$1,416	\$51,736
Mayo	\$32,321	\$1,416	\$30,904
Junio	\$30,750	\$1,416	\$29,334
Julio	\$46,312	\$1,416	\$44,896
Agosto	\$44,028	\$1,416	\$42,611
Septiembre	\$29,916	\$1,416	\$28,500
Octubre	\$34,760	\$1,416	\$33,344
Noviembre	\$48,322	\$1,416	\$46,905
Diciembre	\$47,503	\$1,416	\$46,087
Total anual	\$460,185	\$16,998	\$443,188
Promedio mensual:	\$38,349		\$36,932

2.3.4 Estimación del valor económico del ART para la actividad turística.

El ingreso generado bruto anual por operar una trajinera en promedio es de **\$460,185.10**. De este monto, se requiere anualmente la cantidad de \$16,997.53 por concepto de renovación de la trajinera y gastos de mantenimiento. Por lo que, el ingreso neto anual promedio de operar una trajinera en Xochimilco es de **\$443,187.58**. Este monto representó un ingreso diario promedio de \$1,214.60, con la tarifa calculada al mes de junio del año 2017 (Tabla 17).

Dentro de la zona lacustre de Xochimilco se tienen censadas 1,005 trajineras, que prestan el servicio en 10 embarcaderos. Estimando que el ingreso neto anual por embarcación promedio es de \$443,187.58, se registra que la actividad turística en conjunto tiene la capacidad de generar un estimado de **\$445, 403,522.09** anualmente.

La valoración directa permite estimar el valor del recurso o servicio ambiental a partir del precio de mercado del servicio dependiente de dicho recurso. Para el caso en particular, el monto de \$445.4 millones, representa los beneficios económicos que los remeros de Xochimilco perciben por la existencia de la zona lacustre (servicio ambiental valorado), o en su defecto el monto que tanto los remeros como la economía de la región dejarían de percibir por la desaparición a causa del descuido de las fuentes de agua que permiten mantener el sistema lacustre.

Por lo tanto, el valor económico del ART para la actividad turística de paseo en trajinera representó un estimado anual de **\$462.5 millones**, calculado al mes de junio 2017. Esta cifra será utilizada para estimar el valor del ART de la zona lacustre de Xochimilco junto con el valor calculado en función de la actividad agrícola.

2.5 Comparativa del costo de operación y mantenimiento de las PTAR involucradas frente al valor económico estimado del ART.

Costo de operación de las Plantas de Tratamiento de Agua Residual vinculadas con la zona lacustre de Xochimilco.

Según datos del Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACMEX), el costo total de operación y mantenimiento de las Plantas de Tratamiento de Agua Residual Cerro de la Estrella, San Luis Tlaxialtemalco y San Lorenzo fue en el año 2016 de \$72.4 millones (Tabla 18). De dicho monto para cada PTAR, aproximadamente el 60% se destina al pago de electricidad, el 35% al pago de personal operativo, quedando únicamente el 5%, lo que representó un monto de \$3.6 millones, al mantenimiento de dichas infraestructuras.

Tabla 18. Costo total de operación de las PTAR Cerro de la Estrella, San Luis Tlaxialtemalco y San Lorenzo. Año 2016. Fuente SACMEX 2016.

Planta de Tratamiento de Agua Residuales	Costo energía eléctrica (\$/AÑO)	Mantenimiento de infraestructura (\$/AÑO)	Pago personal operativo (\$/AÑO)	Costo Total Anual (\$/AÑO)	Caudal Instalado (l/s) (SINA CONAGUA)	Caudal tratado (l/s) (SINA CONAGUA)	Costo por m ³ de agua tratada
Cerro de la Estrella	\$38,346,366	\$3,315,372	\$11,867,780	\$53,529,518	4,000.00	1,343.60	\$1.26
San Luis Tlaxialtemalco	\$2,133,410	\$460,850	\$6,860,700	\$9,454,960	150.00	56.10	\$5.34
San Lorenzo	\$2,133,410	\$460,850	\$6,860,700	\$9,454,960	225.00	60.20	\$4.98
Total	\$42,613,187	\$4,237,072	\$25,589,180	\$72,439,439	4,375.00	1,459.90	

Complementada dicha tabla con información del Sistema Nacional de Información del Agua, SINA CONAGUA, se obtuvo la capacidad de tratamiento instalada en dichas PTAR así como el caudal efectivamente tratado. Como se observa en las columnas 6 y 7 (Tabla 18), existe una diferencia superior al 50% entre la capacidad instalada y la capacidad efectivamente tratada.

Condición que puede explicarse en parte, debido a los bajos montos destinados al pago de mantenimiento de dichas PTAR reportados por SACMEX. La diferencia entre la capacidad instalada frente al volumen efectivamente tratado, es para la PTAR Cerro de la Estrella del 44%, para San Luis Tlaxialtemalco del 37%, y San Lorenzo del 26% siendo esta última la que opera en las peores condiciones. Asimismo Riveros (2013) reporta que, según datos de SACMEX para el año 2013, se requería de una inversión de \$29.2 millones para que la PTAR Cerro de la Estrella opere al 100% de su capacidad, dado que reporta que se necesita el

reemplazo de elementos como motores en mal estado, carencia de filtros y trabajos de rehabilitación y remodelación.

Así mismo se observa una relación entre los costos de operación y los volúmenes de agua tratados, en la que, a mayor capacidad de la planta los costos por metro cubico de agua tratada se reducen significativamente. La PTAR San Luis Tlaxialtemalco cuenta con el equipamiento para tratar hasta 150 l/s, a un costo estimado de \$5.34 m³; mientras que la PTAR Cerro de la Estrella con una capacidad 20 veces superior llegando a los 4000 l/s, tiene un costo estimado por metro cúbico de agua tratada de \$1.26 m³, un 77% menos en relación a la PTAR San Luis Tlaxialtemalco.

Para concluir se realizó un ejercicio enfocado a estimar de los costos asociados a incrementar el volumen tratado a la capacidad de diseño de las tres PTAR antes mencionadas. Cabe mencionar que las tres PTAR operan por abajo del 50% de su capacidad de diseño. Para el ejercicio únicamente se modificaron los costos asociados al consumo de energía eléctrica, considerando los costos de mantenimiento y personal operativo en sus valores originales. El ejercicio se realizó estimando los costos totales anuales de operar las PTAR al 50%, 75% y 100% de su capacidad de diseño. Con esta estimación se obtuvo un margen en los costos de operación que van de los \$93.7 millones de operar al 50% de su capacidad, hasta los \$157.6 millones de pesos de operar al 100% de su capacidad de diseño (Tabla 19).

Tabla 19. Costo estimado de operación de las PTAR Cerro de la Estrella, San Luis Tlaxialtemalco y San Lorenzo, de 50% a 100% de su capacidad de diseño. Elaboración propia con datos de SACMEX 2016.

Porcentaje de operación de PTAR	Cerro de la Estrella		San Luis Tlaxialtemalco		San Lorenzo		Costo Total Anual (\$/AÑO)
	Caudal tratado (l/s)	Costo por m ³ de agua tratada	Caudal tratado (l/s)	Costo por m ³ de agua tratada	Caudal tratado (l/s)	Costo por m ³ de agua tratada	
50%	2,000.0	\$ 1.15	75.0	\$ 4.30	112.5	\$ 3.19	\$ 93,745,292.57
75%	3,000.0	\$ 1.07	112.5	\$ 3.27	168.8	\$ 2.50	\$ 125,704,812.86
100%	4,000.0	\$ 1.03	150.0	\$ 2.75	225.0	\$ 2.16	\$ 157,664,333.14

Estimación del valor económico del ART en función de las actividades económicas representativas de la zona lacustre de Xochimilco.

El valor económico estimado total para el recurso hídrico artificial (compuesto de ART), se estableció como la suma de lo que representa la existencia de éste para las dos actividades económicas representativas de la zona lacustre de Xochimilco: la producción agrícola de plantas en invernadero y el servicio turístico de paseo en trajinera. Actividades que además comparten la dependencia al recurso hídrico artificial para poder operar.

- Resultados de la estimación del valor económico del Agua Residual Tratada (ART), en función de dos actividades económicas presentes en la zona lacustre de Xochimilco.

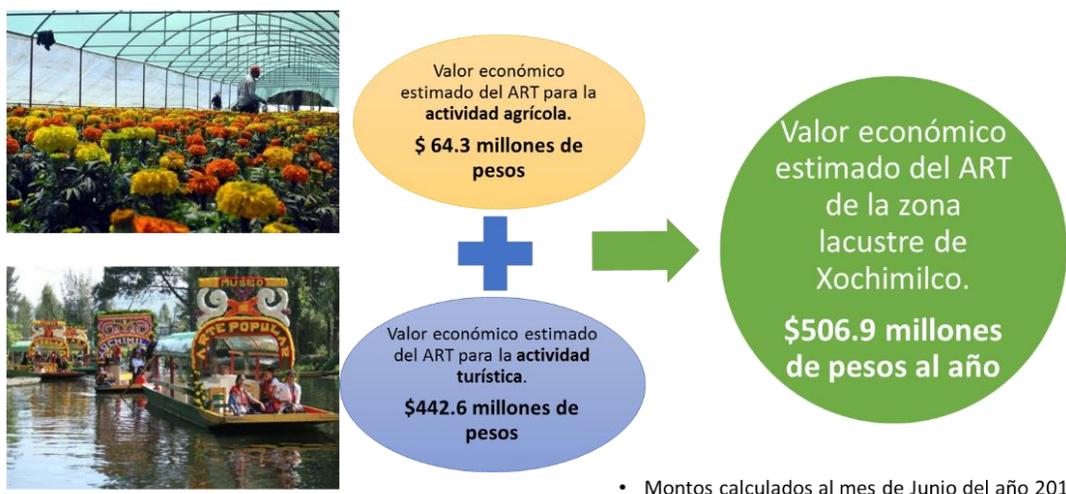


Figura 18. Resultados de la estimación del valor económico del agua residual tratada en función de las actividades económicas representativas en la zona lacustre. Elaboración propia.

El valor económico del ART para la actividad agrícola, se estimó en \$64.3 millones, mientras que el valor económico del ART para la actividad turística es de \$442.6 millones. Por lo tanto, el valor estimado total del ART de la zona lacustre de Xochimilco fue de \$506.9 millones, figura 18.

Considerando que el costo de operación de las PTAR encargadas de dotar agua tratada a la zona lacustre ascendió a \$72.4 millones, representa el 14% del valor económico estimado total del ART (\$506.9 millones anuales). Con el estimado de operar las plantas al 50% de su capacidad dicho porcentaje representa el 18% del valor estimado. Mientras que para la condición de operar al 100% de la capacidad de diseño el porcentaje aumenta hasta un 31%.

Sin embargo queda clara la necesidad que tiene la Ciudad de México en invertir en el mejoramiento de dichas infraestructuras (PTAR) canalizando los recursos necesarios, no solo por cumplimiento medioambiental, sino para mantener las fuentes de empleo relacionadas con el recurso hídrico y conservar la derrama económica que generan.

3. Propuesta de indicador de sostenibilidad hídrica del sistema lacustre de Xochimilco en función de agua residual tratada.

3.1 Descripción del indicador de sostenibilidad hídrica para aplicación a la zona lacustre de Xochimilco.

El capítulo se desarrolla con el objetivo de conocer el estado de sostenibilidad hídrica del sistema lacustre de Xochimilco. Para ello, se propone el desarrollo y utilización del indicador de sostenibilidad hídrica, el cuál utiliza el tiempo de residencia del agua como parámetro de medición. Éste se basa en estimar el número de días que le tomaría a una fuente de agua, sin importar la naturaleza de ésta, sustituir el 100% del volumen contenido en un cuerpo de agua determinado. El indicador propuesto no busca medir condiciones físico químicas del agua, y por tanto no debe ser interpretado como indicador de calidad de agua. Su objetivo es estimar el número de días de residencia del agua, y con ello tener un parámetro de medición adicional sobre las condiciones físicas de la zona lacustre de Xochimilco en función del ingreso de ART en temporada de estiaje.

El indicador aquí propuesto, considerado como indicador simple de una sola variable, toma como base la metodología utilizada para la realización de balance hídrico. Este concepto establece que la diferencia entre las entradas y salidas de un sistema lacustre, se verá reflejado como la variación del volumen de agua almacenada, reflejada como el cambio en la profundidad de un cuerpo de agua (Sokolov & Chapman, 1981).

3.2 Metodología de aplicación del indicador de sostenibilidad hídrica.

Para el caso de estudio, el indicador busca estimar el número de días que le toma a los ingresos de ART sustituir el 100% del agua contenida en canales y lagos. Por lo que se estableció que dicho volumen será estático, para operar como Volumen de Control (*VC*). Para mantener el principio de continuidad, se añade la variable de volumen de salida (*SL*) a la función original de balance hídrico, por lo que todo ingreso no repercute como un incremento en el nivel del agua. Asimismo, la variable de agua residual cruda (*ARC*), se integra a la ecuación como una variable de salida, por los contaminantes presentes en ella.

Por lo tanto, la ecuación de balance hídrico se modifica de tal manera que su resultado es la estimación del volumen de salida (SL) por día, quedando la función de la siguiente manera:

$$SL = E + Vt - Rg - Ev - Inf - ARC$$

Donde:

SL	Volumen de salida estimado (m^3)
E	Volumen de entrada (m^3)
Vt	Volumen de trasvase (m^3)
Rg	Consumo para riego agrícola (m^3)
Ev	Volumen evaporado (m^3)
Inf	Infiltración (se considera cero)
ARC	Agua residual cruda (m^3)

El volumen de trasvase (Vt), es la variable que representa el agua proveniente de cuerpos de agua contiguos localizados en cotas superiores, separados por las estructuras de control, como son represas de costalera, compuertas y esclusas. Cabe recordar que en el sistema lacustre de Xochimilco se identificaron siete plataformas de agua, con alturas diferenciadas, en donde los cuerpos de cotas superiores trasvasan por gravedad sus aguas a los inferiores. El volumen de infiltración (Inf) se consideró como cero, por falta de información sobre el tema y asumiendo un subsuelo saturado a lo largo del año.

La metodología aquí propuesta, utilizó como volúmenes de entrada (E), los datos de ingreso de ART de dos fuentes: a) los gastos de ingreso de ART reportados por SACMEX 2014, b) los gastos de ingreso reportados en el informe PUMA 2014; y finalmente los gastos de ingreso estimados de operar las PTAR al 100% de su capacidad de diseño.

Finalmente para la calcular el *tiempo de residencia*, expresado en número de días que le toma al sistema sustituir el volumen de control, se estableció la siguiente ecuación:

$$\frac{VC}{SL} = 1$$

Donde:

VC	Volumen de control (m^3)
SL	Volumen de salida estimado (m^3)

Por lo tanto, al estimar el volumen diario que sale del sistema, es posible relacionarlo con el volumen de control y, de este modo, obtener el número de días que le toma a las fuentes sustituir el 100% del volumen de control.

La aplicación del indicador de sostenibilidad hídrica se realizó bajo las condiciones denominadas como estrés hídrico, establecidas en la *Gráfica 8. Relación de precipitación, temperatura y evaporación anual, elaboración propia con datos de la estación climatológica Muyuguarda (IMTA, 2006), del año 1921 a 1988*, subcapítulo 1.1 del presente documento. Utilizando como volumen de entrada los gastos de entrada de ART reportados por SACMEX 2014 y PUMA 2014.

En particular se tomaron los datos de temperatura y evaporación potencial del mes de mayo, dado que se presentan características concurrentes de baja precipitación, altas temperaturas y alto potencial de evaporación, representando un reto para mantener el estado del sistema lacustre con ingresos de ART.

Este indicador no busca medir la calidad presente en un cuerpo de agua, dado que para lograr dicho fin se requiere de la recopilación de información de variables físico-químicas y microbiológicas que rebasan los alcances del presente trabajo. Busca estimar el tiempo de residencia del agua en función de los aportes de agua reportados por SACMEX 2014 y PUMA 2014. El indicador se aplicó a cada una de las siete zonas que subdividen el sistema lacustre, por lo que los resultados fueron mapeados para identificar espacialmente cada situación.

3.2.1 Interpretación del indicador.

El indicador aquí propuesto no busca determinar la calidad del sistema, únicamente busca estimar el tiempo de residencia del agua. Para mapear los resultados se establecieron cuatro categorías de posibles resultados, acordes al tiempo de residencia. En la Figura 19 se presentan las cuatro categorías establecidas para el mapeo de resultados.

Un *tiempo de residencia* igual a 1, indica que los aportes de ART son suficientemente altos para reponer los volúmenes de agua consumidos y al mismo tiempo sustituir el 100% del agua contendía en los cuerpos de agua en un solo día, cabe recordar que es solo la forma de

interpretación del indicador. Por lo tanto, valores de tiempo de residencia bajos, cercano a 1, representan una mejor condición del estado del sistema lacustre. Por el contrario, valores altos son indicador de una situación desfavorable, en la cual los aportes de ART no son suficientes. Valores negativos indican que los ingresos de agua no son suficientes para reponer el agua que se pierde.

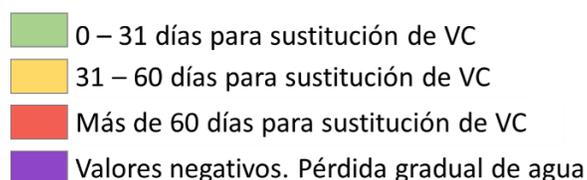


Figura 19. Categorías establecidas para el mapeo de los resultados en la zona lacustre de Xochimilco.

La primera categoría, recuadro verde, comprende de 0 a 31 días. Se estableció en 31 días el tope de la categoría dado que es el número de días del mes de referencia (mayo), donde se experimentan condiciones de *estrés hídrico*.

Si el tiempo de residencia es mayor a 31 días se considera que el volumen de ART que ingresa no es capaz de sustituir el VC del mes de referencia (mayo), pasa a la segunda categoría, color anaranjado, teniendo como máximo 60 días o 2 meses. La tercera categoría, color rojo, supera los 60 días para sustituir el volumen de control.

Finalmente la cuarta categoría, color morado, son los resultados con valores negativos. Esta condición es indicativo de que la fuente de ART no es capaz de reponer el agua que se pierde por evaporación natural y consumo agrícola, resultando en un balance negativo. Este valor se puede interpretar como el número de días en los que el sistema quedaría completamente seco, y se reflejará como el descenso gradual del tirante de agua de canales y cuerpos de agua.

3.3 Descripción de variables aplicadas a la zona lacustre de Xochimilco.

a. Estimación del volumen de control (VC).

Se realizó la estimación del volumen de agua contenida en canales y cuerpos de agua naturales de las 7 zonas que componen el sistema lacustre

El volumen de control (VC) se estimó de la siguiente manera:

$$VC = (SC + SN) * (St) * Pm$$

Donde:

- VC Volumen de control estimado
 SC Superficie de canales
 SN Superficie de cuerpo de agua natural
 St Sección transversal
 Pm Profundidad media estimada

Los datos de superficie de *cuerpos de agua naturales* y *canales* se tomaron de *Tabla 1. Superficies de agua por zona*, contenida en el presente documento Capítulo 1. Se estableció una profundidad promedio de 2 metros para el cálculo de volumen. Asimismo se estableció un factor de reducción de 0.75 denominado *Sección transversal*. Este factor tiene como finalidad compensar la forma de taludes de las márgenes de los canales y cuerpos de agua naturales. A continuación, se presentan los volúmenes estimados, organizados de la cota más alta a la más baja (Tabla 21).

Tabla 20. Volumen de control estimado para cada una de las siete plataformas de agua que componen el sistema lacustre de Xochimilco. Elaboración propia.

Plataforma de agua	Cota media espejo de agua m.s.n.m.	Sup total de la poligonal (m ²)	Sup de canales (m ²)	Sup de cuerpos de agua naturales (m ²)	Volume de Control (m ²) (VC)
Zona 1	2233.5	726,219.64	131,110.95	0.00	196,666.43
Zona 2	2232	1,359,630.15	77,938.53	0.00	116,907.80
Zona 3	2232	1,428,570.14	131,058.82	0.00	196,588.23
Zona 4	2231.5	1,288,161.28	189,985.47	0.00	284,978.20
Zona 5	2231	11,778,246.21	1,993,210.09	389,862.44	3,574,608.79
Zona 6	2230.5	4,790,028.83	19,350.50	1,220,298.11	1,859,472.93
Zona 7	2231	408,365.52	325,771.62	0.00	488,657.43
Total			2,868,425.98	1,610,160.55	6,717,879.80

b. Ingreso de agua residual cruda.

Se presenta el ingreso de Agua Residual Cruda (ARC) a la zona lacustre debido a la presencia de asentamientos humanos informales, la carencia en la cobertura de drenaje sanitario y la falta de PTAR para atender dicha demanda. Asimismo las chinampas urbanizadas no cuentan con cobertura de drenaje, convirtiéndose también en fuentes potenciales de ARC. Se identificaron las manzanas urbanas que no cuentan con cobertura de drenaje sanitario, así

como las que cuentan con red de drenaje, pero ésta desemboca en la zona de canales sin un tratamiento previo (Figura 20).

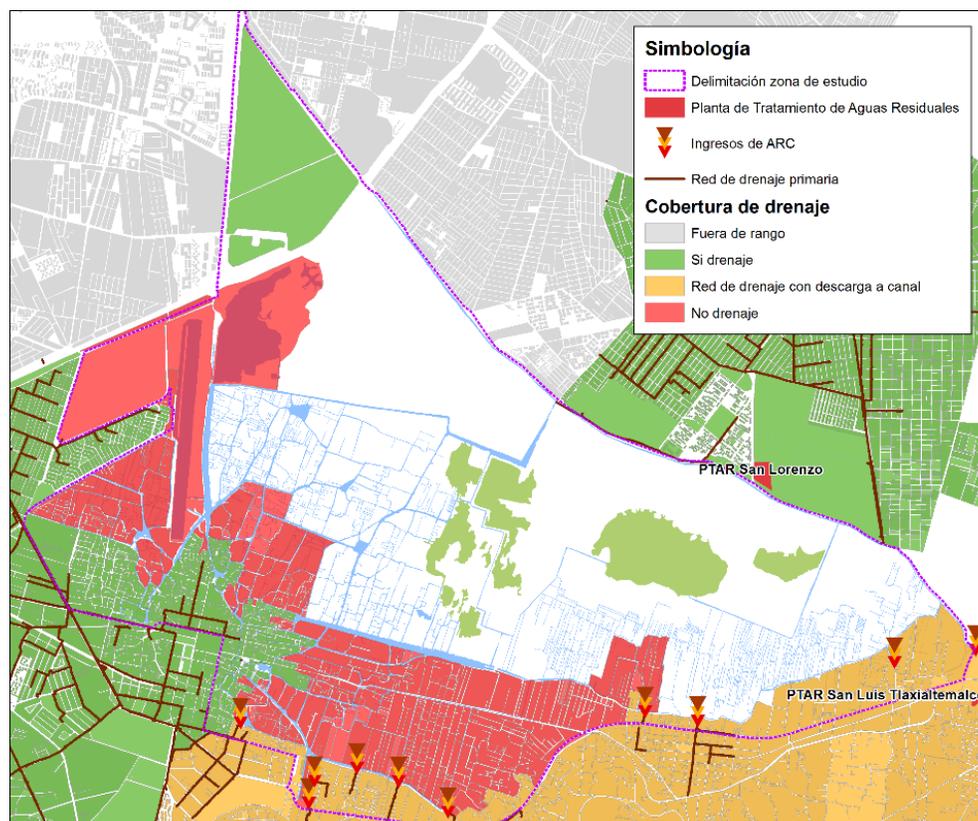


Figura 20. Identificación de los aportes de ARC a la zona lacustre de Xochimilco, Elaboración propia.

Se estimó el volumen de ARC generado, multiplicando el número de habitantes por manzana urbana, por una dotación estimada de 90 l/habitante/día y un factor de descarga de 0.8. Se estableció al ARC con condiciones de variable de salida, en función de que el aporte sin un previo tratamiento degrada la condición de estado, antes de favorecerla, por lo que es una variable con factor negativo. Asimismo, para fines prácticos y empíricos, se estima que cada metro cúbico de agua residual cruda vertida al sistema lacustre, equivale a extraer 2 m³ de agua residual tratada (Tabla 21).

Tabla 21. Volumen estimado de ARC que ingresa al sistema lacustre de Xochimilco. Elaboración propia.

Plataforma de agua	Entradas de ARC (Red de drenaje público)	Gasto estimado de ARC (m ³ /día)	ARC * 2 (m ³ /día)
Zona 1	6	6,655	13,309
Zona 2	0	-	-
Zona 3	2	1,812	3,623
Zona 4	0	-	-
Zona 5	2	8,832	17,663
Zona 6	0	-	-
Zona 7	0	-	-
Total	10	17,298	34,596

c. Ingreso de agua residual tratada (E).

El volumen de entrada (E), se compone básicamente del ingreso de ART. Se estimó éste en función de los puntos de aporte particulares a cada una de las zonas que componen el sistema lacustre de Xochimilco. Se utilizaron los datos contenidos en la Tabla 3. Caudales de suministro de ART. Datos de SACMEX 2014 contrastados con caudales PUMA 2014. Fuente PUMA, 2014.; así como los datos contenidos en la Tabla 4. Incremento potencial en los gastos de entra de ART, tomando como referencia los gastos reportados por SACMEX 2014, e incrementados a la capacidad total instalada de las PTAR. Elaboración propia.; ambas partes del presente documento. Como resultado, se obtuvieron los siguientes volúmenes de entrada de ART por zona (Tabla 22).

Tabla 22. Volúmenes estimados de ART que ingresan al sistema lacustre de Xochimilco. Elaboración propia con datos medidos y reportados por fuentes institucionales.

Plataforma de agua	ART SACMEX		ART POTENCIAL SACMEX		ART PUMA	
	Q total ART (l/s)	Volumen total (m ³ /día)	Q total (l/s)	Q total (m ³ /día)	Q total (l/s)	Q total (m ³ /día)
Zona 1	300	25,920	985	85,104	62	5,332
Zona 2	-	-	-	-	-	-
Zona 3	80	6,912	262	22,637	43	3,758
Zona 4	110	9,504	361	31,190	68	5,873
Zona 5	435	37,584	1,427	123,293	27	2,293
Zona 6	-	-	-	-	-	-
Zona 7	50	4,320	164	14,170	-	-
Total:	975	84,240	3,200	276,394	200	17,256

d. Volumen de trasvase.

El volumen de trasvase (V_t) es el agua proveniente de cuerpos de agua contiguos ubicados en cotas elevadas. El trasvase se da de manera natural gracias a la fuerza de gravedad. En el diagrama 3, se describe la interrelación de trasvase que existe entre las siete zonas que componen el sistema lacustre. En la parte superior se ubican las zonas pertenecientes a cotas superiores. Las zonas 1, 3, 4 y 7 trasvasan por gravedad sus aguas a la zona 5, y ésta a su vez a la zona 6, para finalmente, si existe un excedente descargar hacia el Canal de Chalco. El trasvase proveniente de la zona 1 a la zona 2 se estableció en una proporción de $4/6 SL_{zona 1}$, mientras que el trasvase de la zona 1 a la zona 5 se estableció en $2/6 SL_{zona 1}$.

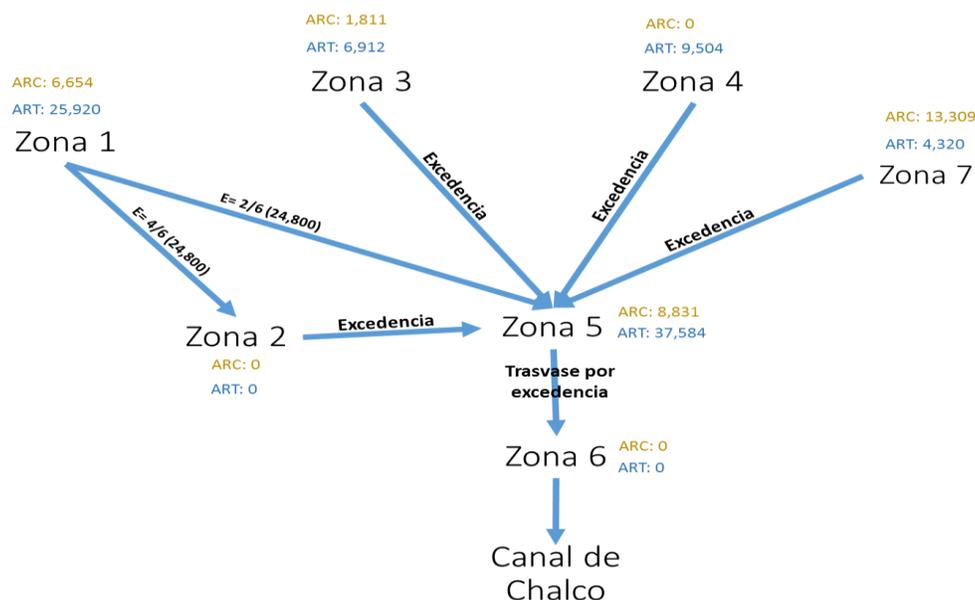


Figura 21. Simplificación de funcionamiento del sistema lacustre de Xochimilco, con ingreso de ART reportado por SACMEX 2014 y ARC estimada. Elaboración propia.

e. Consumo de agua para riego agrícola.

Los consumos de agua para riego agrícola (R_g), se calcularon con información procedente de la Tabla 3. Resultados de la estimación de superficie chinampera ocupada por *invernaderos*, junto con los requerimientos de agua para riego agrícola estimados en el subcapítulo 2.3.3 del presente documento. Como se observa en la Tabla 23, de las siete zonas analizadas, dos no cuentan con presencia de *invernaderos*, zonas 6 y 7, por lo que en el balance no presentan un volumen de salida.

Tabla 23. Estimación en el consumo de agua para riego agrícola. Elaboración propia.

Plataforma de agua	Superficie agrícola (m ²)	Consumo de agua para riego mes de Mayo (m ³ /día)
Zona 1	46,506	211
Zona 2	218,114	988
Zona 3	411,522	1,864
Zona 4	21,104	96
Zona 5	706,014	3,198
Zona 6	0	0
Zona 7	0	0
Total	1,403,260	6,357

f. Evaporación natural de cuerpos de agua (Ev)

El volumen de evaporación natural de los cuerpos de agua (Ev), se calculó utilizando la superficie total de cuerpos de agua naturales como artificiales. Dicha superficie fue multiplicada por el potencial de evaporación media diaria y se le aplicó un factor de disminución de 0.7, el cual es aplicable a cuerpos de agua profundos. El estimado diario total de evaporación para el mes de mayo es de 11,953 m³ (Tabla 24).

Tabla 24. Volumen estimado de evaporación diaria durante el mes de mayo. Elaboración propia.

Plataforma de agua	Sup total de cuerpos de agua (m ²)	Evaporación diaria. Mes de mayo. (161.5 mm/mes) * (0.7)	Estimado de evaporación (m ³ /día)
Zona 1	131,111	4	546
Zona 2	77,939	4	325
Zona 3	131,059	4	546
Zona 4	189,985	4	792
Zona 5	2,383,073	4	8,306
Zona 6	1,239,649	4	81
Zona 7	325,772	4	1,358
Total	4,478,587	N/A	11,953

3.4 Aplicación del indicador del estado de sostenibilidad hídrica del sistema lacustre de Xochimilco.

Para integrar las variables que componen el indicador propuesto, denominado *Tiempo de residencia del agua*, se hizo uso de la herramienta de modelaje conocida como Vensim. Dicha herramienta permite la integración de las variables propuestas y la interrelación de las zonas analizadas.

El modelo se integra por siete módulos, donde la información de algunos módulos es compartida con otros y al mismo tiempo los resultados de unos alimentan a otros. Asimismo el modelo tiene la característica de poder ser modificado y alimentado con nueva información, y esta modificar los resultados (Figura 22).

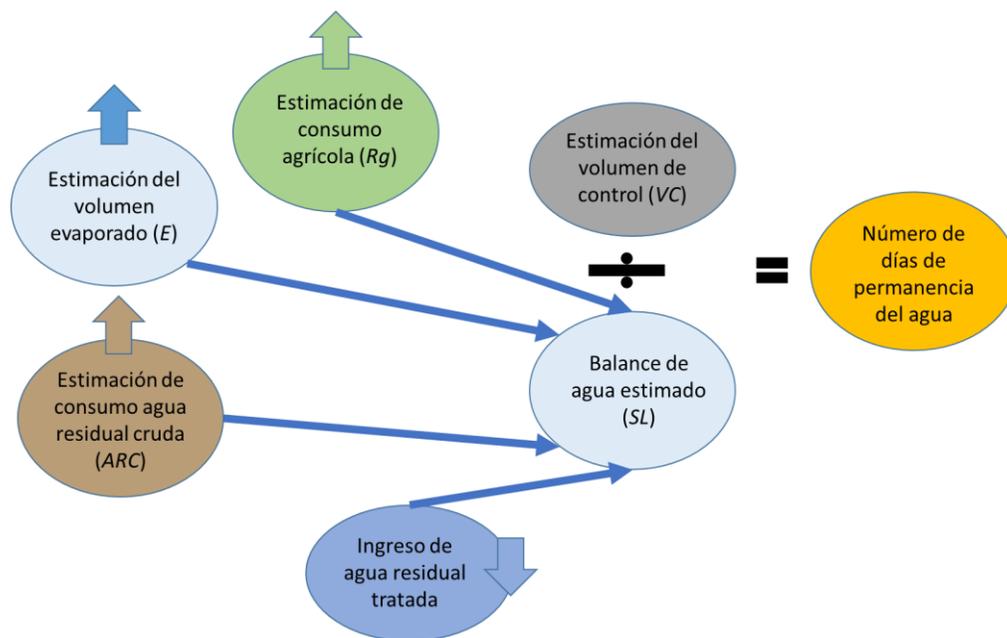


Figura 22. Esquema con variables simplificadas contenidas en el Modelo Vensim para estimación de tiempo de residencia del agua. Elaboración propia.

Como se observa en la Figura 23, dicha herramienta permite explicar y entender de manera gráfica la conexión existente entre las variables que componen el indicador. Asimismo el modelo es capaz de entregar como resultado el número de días que le tomaría a los ingresos de ART el reponer el volumen de control (VC).

Se realizaron tres modelaciones, con diferentes combinaciones. Se realizó una modelación para cada uno de los volúmenes de entrada de ART contenidos en la Tabla 3. Caudales de suministro de ART. Datos de SACMEX 2014 contrastados con caudales PUMA 2014. Fuente PUMA, 2014. y Tabla 4. Incremento potencial en los gastos de entra de ART, tomando como referencia los gastos reportados por SACMEX 2014, e incrementados a la capacidad total instalada de las PTAR. Elaboración propia. Subcapítulo 1.3. Para cada modelación se realizaron tres escenarios, el primero de ellos denominado como *Sistema Natural*, que considera únicamente el módulo de evaporación natural; el segundo denominado *Sistema Natural & Agrícola*, toma los módulos de evaporación natural y consumo agrícola; finalmente el tercer escenario *Sistema Natural & Agrícola & ARC*, toma los módulos antes expuestos más el de aportes de agua residual cruda procedente de las descargas clandestinas. Por lo tanto se tiene un total de nueve combinaciones de resultados diferentes.

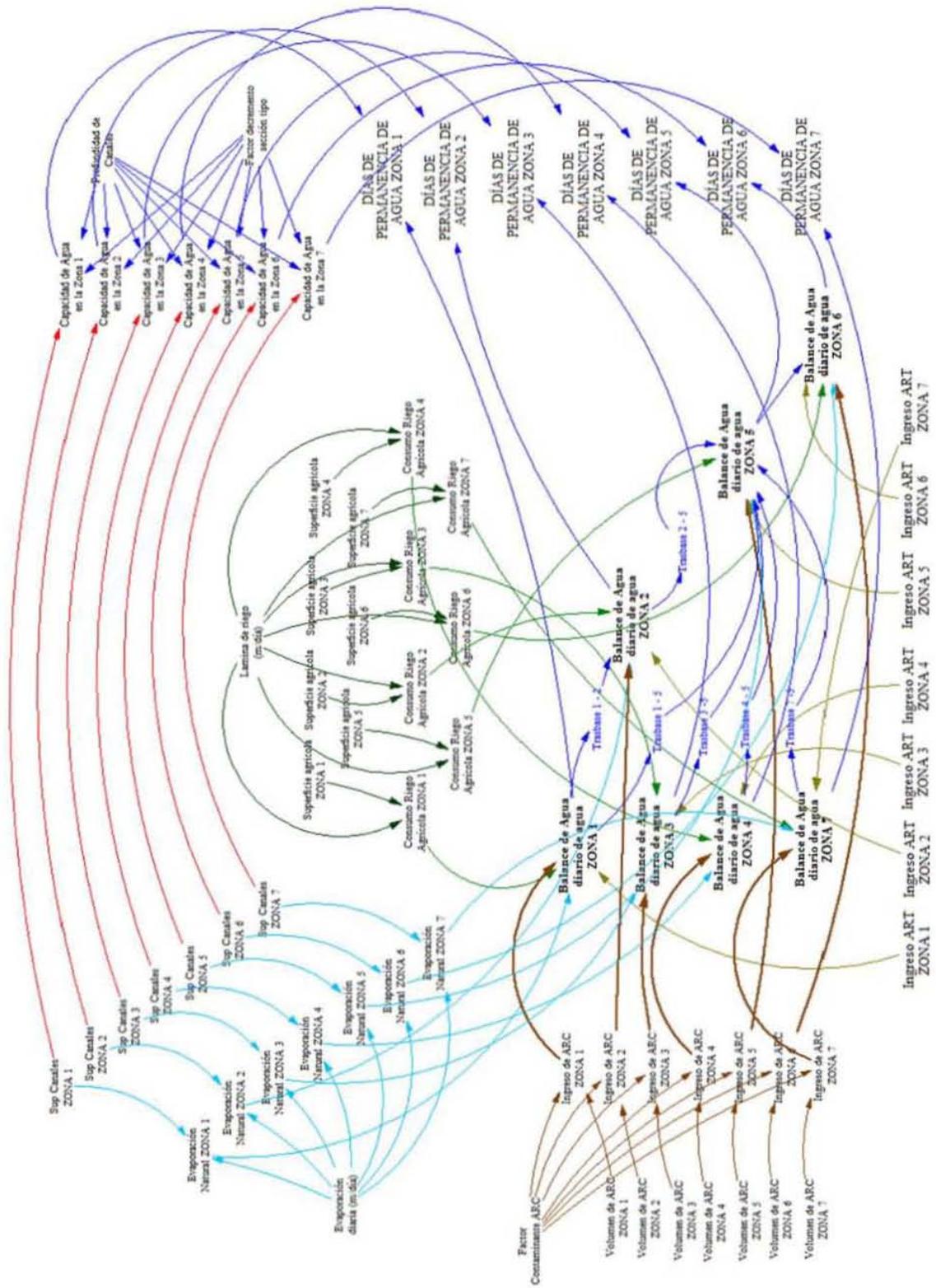


Figura 23. Interrelación de las variables. Descripción de funcionamiento, Modelo Vensim. Elaboración propia.

3.5 Resultados del indicador de sostenibilidad hídrica del sistema lacustre de Xochimilco.

Los resultados del tiempo de residencia del agua, están dados como el número de días que tardan los aportes de ART en sustituir el volumen de agua contenida en canales y cuerpos de agua (VC). Valores que están concentrados en las Tablas 25 a 27, las cuales corresponden a las diferentes fuentes a ART. La Tabla 25 corresponde a los portes de ART reportados por SACMEX 2014, la Tabla 26 corresponde a lo reportado por PUMA 2014, mientras que la Tabla 27 corresponde al volumen potencial que podrían entregar las PTAR Cerro de la Estrella, San Lorenzo y San Luis Tlaxiátemalco de operar al 100% de su capacidad de diseño.

Asimismo se mapearon los resultados obtenidos para identificar espacialmente como se distribuyen los tiempos de residencia a lo largo de la zona lacustre de Xochimilco. Por lo tanto cada tabla de resultados va acompañada de tres mapas, correspondientes a los tres escenarios planteados.

Como se observa en las tablas 25, 26 y 27, a medida que se integran los módulos de *Agricultura y Agua Residual Cruda*, se incrementa el número de días totales que le toma al sistema sustituir el volumen de control. A continuación se presentan los resultados obtenidos por la aplicación del indicador de sostenibilidad hídrica a las siete zonas que componen la zona lacustre de Xochimilco.

3.5.1 Resultados con volumen SACMEX ($Q_{ART} = 84,240 \text{ m}^3/\text{día}$)

La Tabla 25 corresponde a los resultados del tiempo de residencia del agua, de los volúmenes de ingreso de ART reportados por SACMEX 2014, bajo los tres escenarios propuestos. Bajo las condiciones actuales (Figura 26), únicamente dos de las siete zonas mantienen un periodo inferior a los 31 días (zona 1 y 2), las cuales se ubican más próximas a los puntos de entrega de ART.

Asimismo los resultados son desfavorables para las zonas 3, 5 y 7, en las cuales los tiempos son superiores a los 100 días, lo que indica que si bien los aportes son suficientes para reponer

el agua que se consume y evapora, no lo son para sustituir el volumen de control (VC). Los gastos de entrada que reporta SACMEX 2014 resultan ser insuficientes para sustituir en menos de 31 días el agua de canales y cuerpos de agua pudiendo presentarse procesos de eutrofización.

Tabla 25. Tiempo de residencia del agua. Sustitución del volumen de control (CV), durante el mes de mayo. Calculado con gastos de entrada reportados por SACMEX 2014. Elaboración propia.

Plataforma de agua	Sistema Natural (Entrada ART - Evaporación Natural)	Sistema Natural & Agrícola (Entrada ART - (Evaporación Natural + Consumo Agrícola))	Sistema Natural & Agrícola & ARC (Entrada ART - (Evaporación Natural + Consumo Agrícola + (2*ARC)))
Zona 1	8	8	17
Zona 2	15	18	18
Zona 3	31	44	224
Zona 4	33	33	33
Zona 5	68	73	114
Zona 6	59	59	59
Zona 7	165	165	165
Promedio	54	57	90

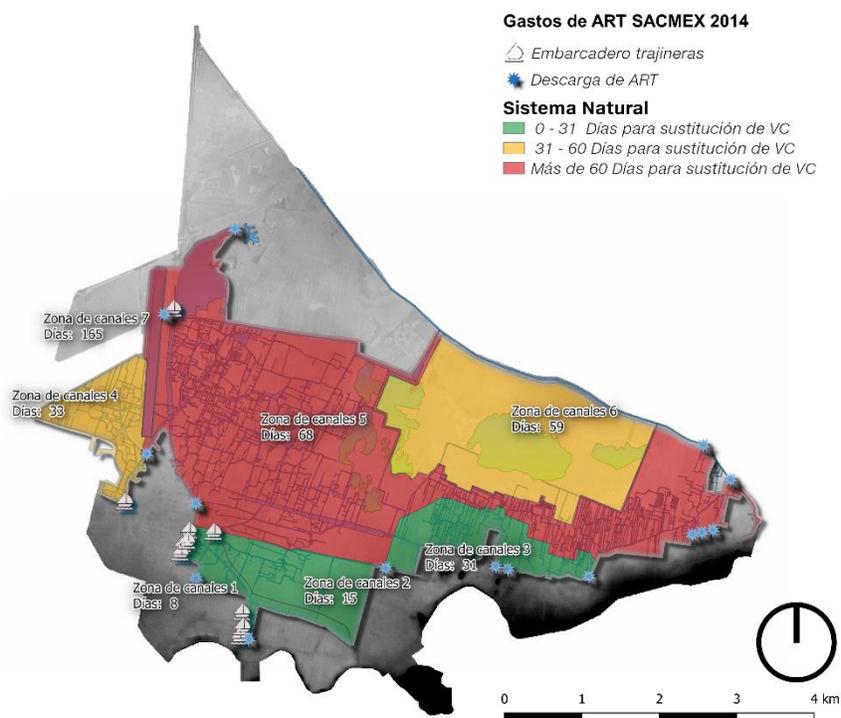


Figura 24. Mapeo de resultados en condiciones naturales, calculado con gastos de entrada reportados por SACMEX. Elaboración propia.

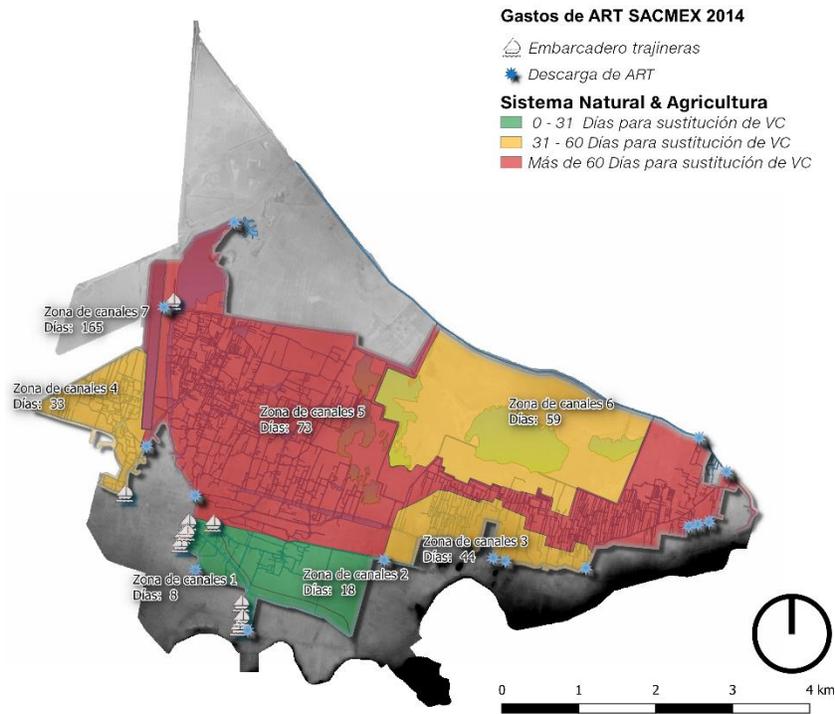


Figura 25. Mapeo de resultados en condiciones naturales más consumo agrícola, calculado con gastos de entrada reportados por SACMEX. Elaboración propia.

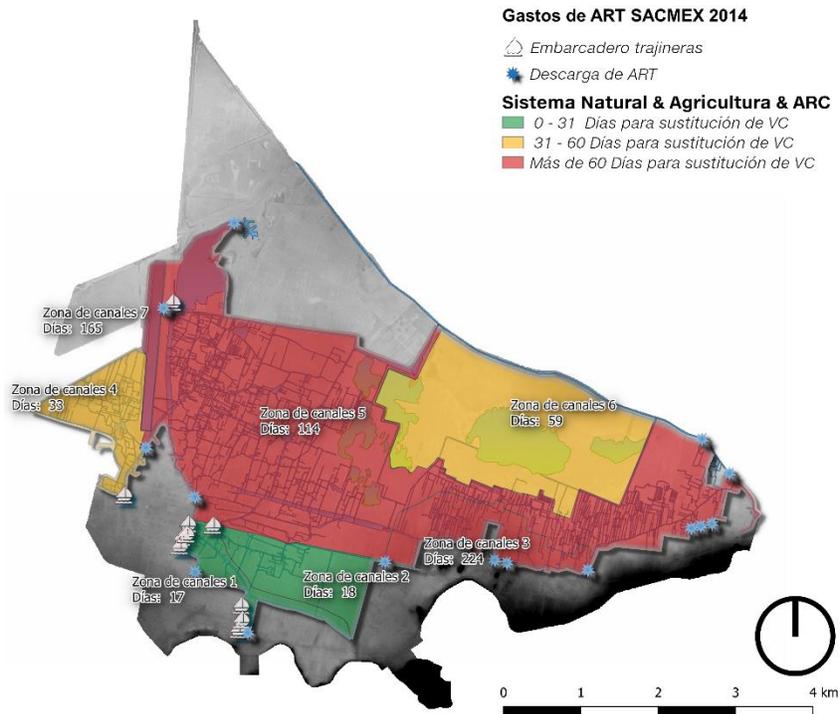


Figura 26. Mapeo de resultados en condiciones naturales más consumo agrícola y descargas clandestinas, calculado con gastos de entrada reportados por SACMEX. Elaboración propia.

3.5.2 Resultados con volumen PUMA 2014 (Q ART = 17,255 m³/día)

Los resultados reportados en la Tabla 26, correspondiente a los volúmenes de ingreso de ART reportados en PUMA 2014. Bajo los tres escenarios propuestos los resultados son desfavorables, dado que los gastos de entrada resultan ser insuficientes para mantener el volumen de agua en canales y cuerpos de agua. La existencia de resultados con números negativos indica pérdida gradual de agua y descenso del nivel de canales y cuerpos de agua. En las figuras 27 a 29, se observa un decremento en cada una de las zonas que componen el sistema lacustre de Xochimilco, con excepción de la zona cuatro.

De mantenerse las condiciones de estrés hídrico (experimentadas durante el mes de mayo), el sistema lacustre quedaría sin agua en el número de días indicado en la Tabla 26, orillando al sistema a la siguiente cuenca de atracción denominada como *desierto lacustre*. Cabe recordar que el modelo propuesto no contempla los ingresos de agua pluvial y está diseñado para condiciones de estrés hídrico (poca o nula precipitación y elevadas temperaturas promedio).

Tabla 26. Tiempo de residencia del agua. Sustitución del volumen de control (CV), durante el mes de mayo. Calculado con gastos de entrada reportados por PUMA 2014. Elaboración propia.

Plataforma de agua	Sistema Natural (Entrada ART - Evaporación Natural)	Sistema Natural & Agrícola (Entrada ART - (Evaporación Natural + Consumo Agrícola))	Sistema Natural & Agrícola & ARC (Entrada ART - (Evaporación Natural + Consumo Agrícola + (2*ARC)))
Zona 1	41	43	-22
Zona 2	-19	-16	-16
Zona 3	61	170	-80
Zona 4	56	57	57
Zona 5	-238	-193	-99
Zona 6	-51	-51	-51
Zona 7	-360	-360	-360
Promedio	-73	-50	-82

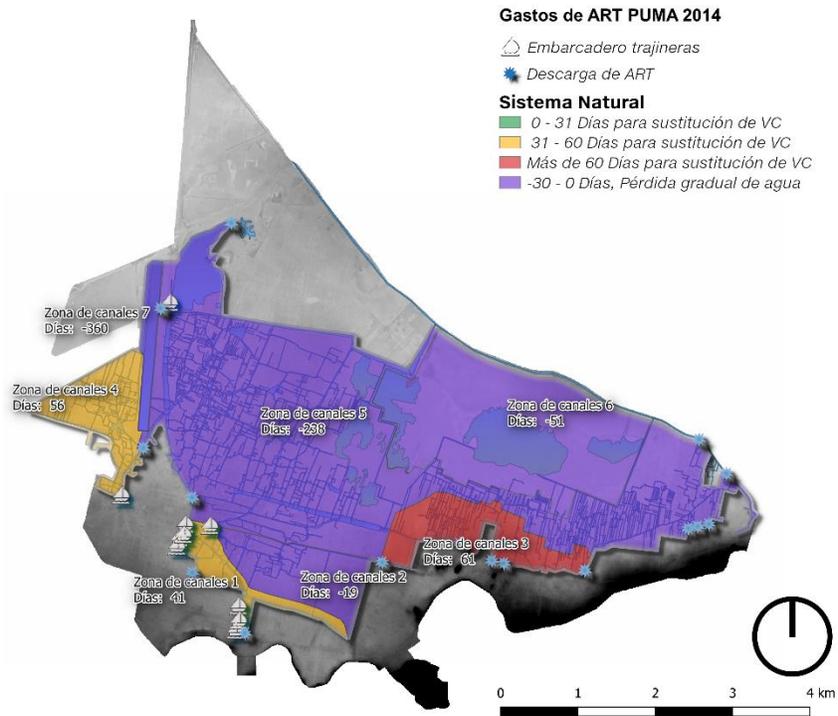


Figura 27. Mapeo de resultados en condiciones naturales, calculado con gastos de entrada reportados por PUMA 2014. Elaboración propia.

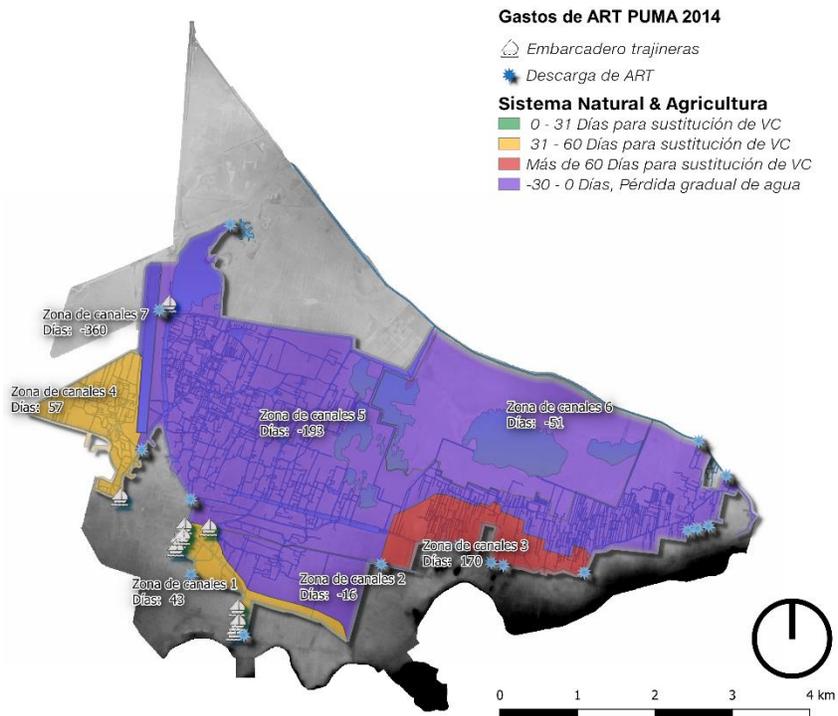


Figura 28. Mapeo de resultados en condiciones naturales más consumo agrícola, calculado con gastos de entrada reportados por PUMA 2014. Elaboración propia.

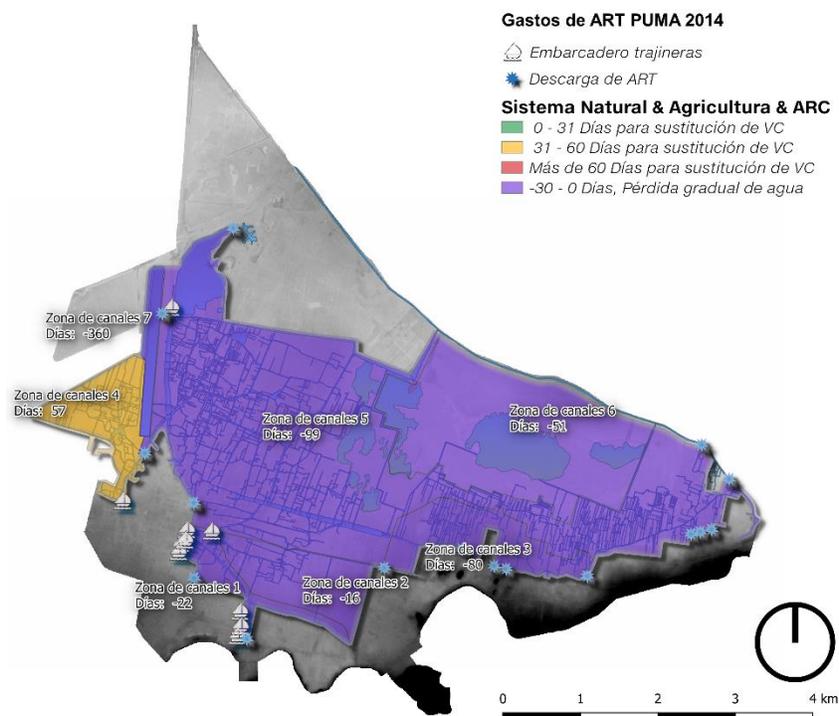


Figura 29. Mapeo de resultados en condiciones naturales más consumo agrícola y descargas clandestinas, calculado con gastos de entrada reportados por PUMA 2014. Elaboración propia.

3.5.3 Resultados con volumen potencial SACMEX ($Q_{ART} = 276,000 \text{ m}^3/\text{día}$)

Tabla 27. Tiempo de residencia del agua. Sustitución del volumen de control (CV), durante el mes de mayo. Calculado con gastos de operar las PTAR al 100 % de capacidad de diseño. Elaboración propia.

Plataforma de agua	Sistema Natural (Entrada ART - Evaporación Natural)	Sistema Natural & Agrícola (Entrada ART - (Evaporación Natural + Consumo Agrícola))	Sistema Natural & Agrícola & ARC (Entrada ART - (Evaporación Natural + Consumo Agrícola + (2*ARC)))
Zona 1	2	2	3
Zona 2	2	3	3
Zona 3	9	10	12
Zona 4	9	9	9
Zona 5	15	15	16
Zona 6	8	8	8
Zona 7	38	38	38
Promedio	12	12	13

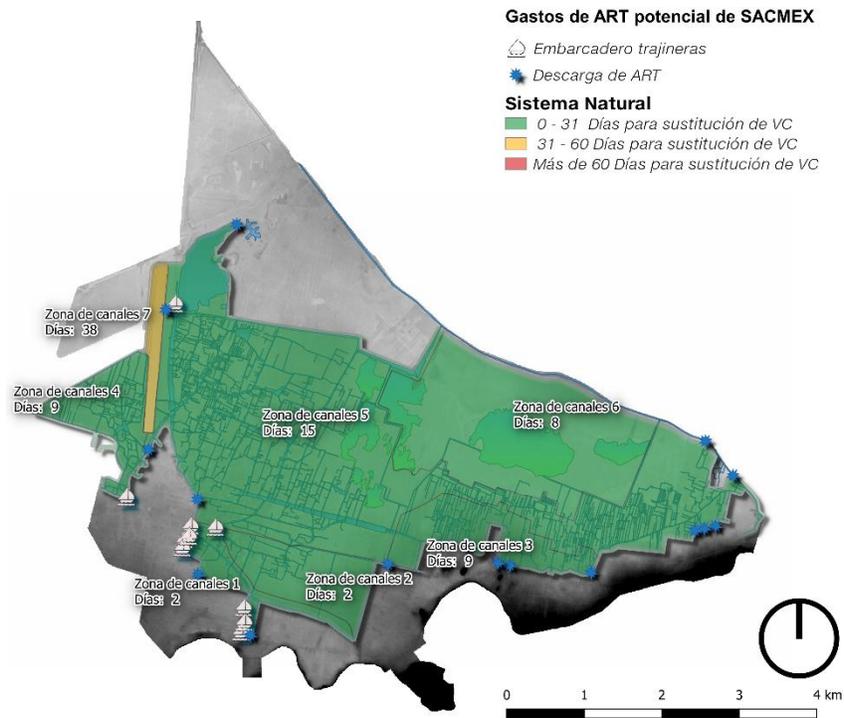


Figura 30. Mapeo de resultados en condiciones naturales, calculado con gastos de operar las PTAR a capacidad de diseño. Elaboración propia.

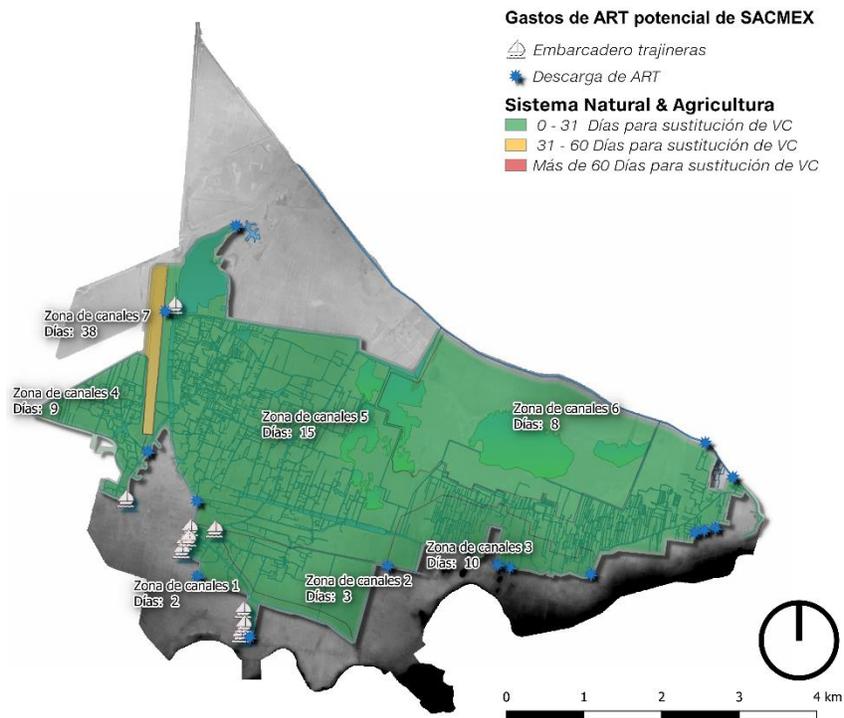


Figura 31. Mapeo de resultados en condiciones naturales más consumo agrícola, calculado con gastos de operar las PTAR a capacidad de diseño. Elaboración propia.

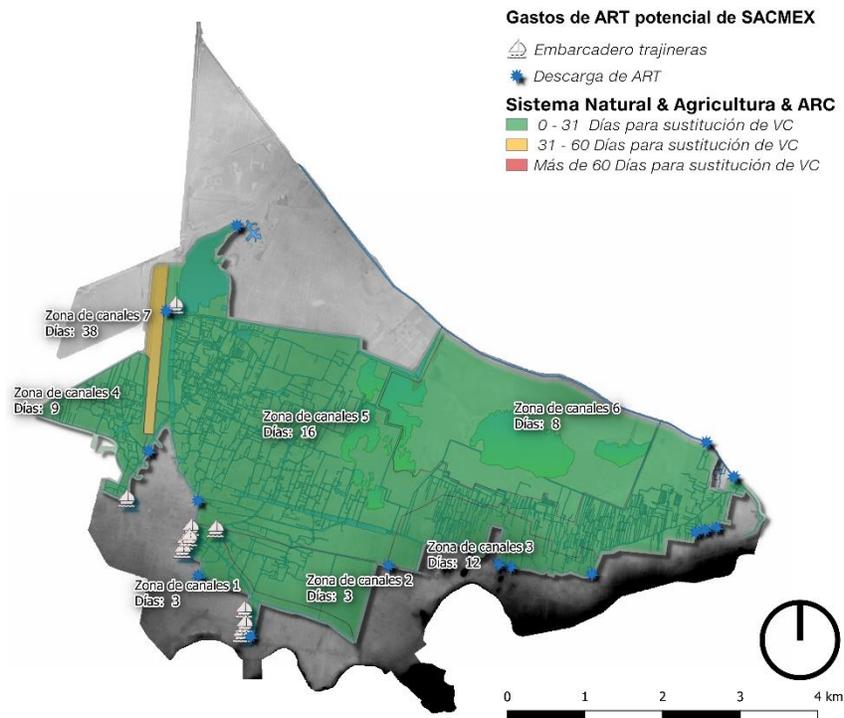


Figura 32. Mapeo de resultados en condiciones naturales más consumo agrícola y descargas clandestinas, calculado con gastos de operar las PTAR a capacidad de diseño. Elaboración propia.

4. Discusión.

Tras el desarrollo del proyecto de investigación con sus respectivas conclusiones se puede establecer una relación positiva entre los beneficios económicos que conlleva el mantenimiento del recurso hídrico artificial (presupuesto destinado a las PTAR) con las actividades económicas de la zona lacustre. Asimismo se exploraron los volúmenes necesarios para mantener un estado favorable del sistema lacustre de Xochimilco, llegando a la conclusión que lo reportado por SACMEX 2014 y medido por PUMA 2014 corresponden a un estado de vulnerabilidad hídrica del sistema lacustre. Dichos resultados, obtenidos por la valoración económica (Capítulo 2) como del indicador de sostenibilidad hídrica (Capítulo 3), se resumen en la Figura 33.

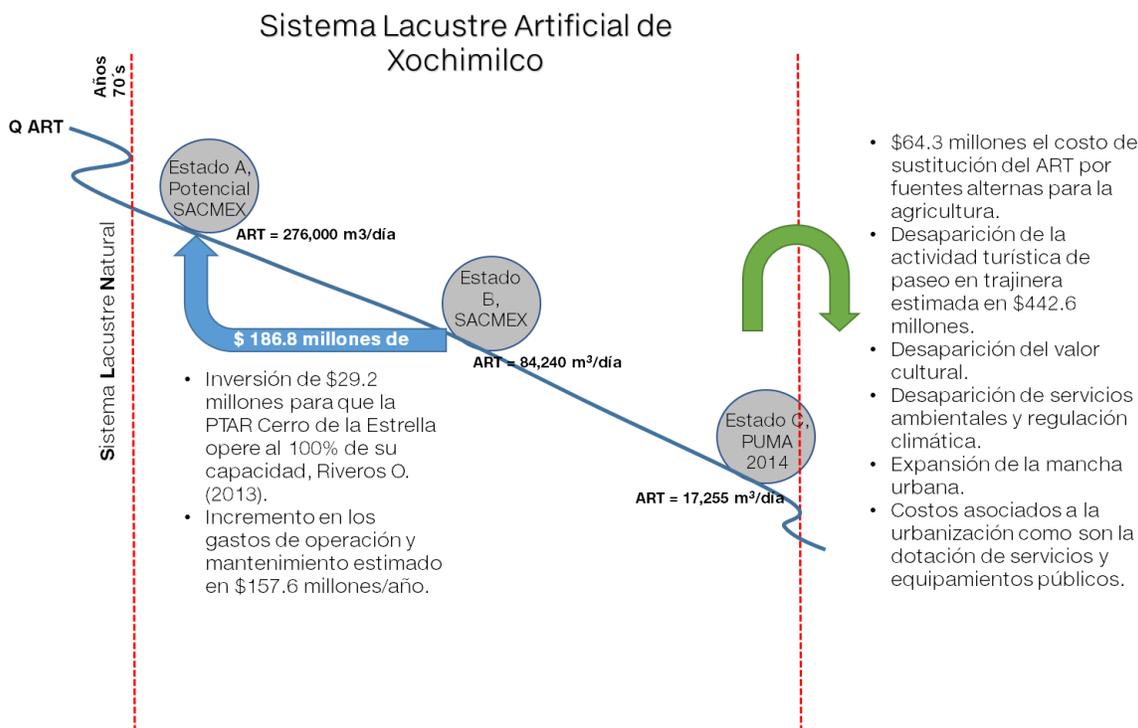


Figura 33. Estados del sistema lacustre artificial de Xochimilco, elaborado con resultados de valoración económica del recurso hídrico artificial e indicador de sostenibilidad hídrica. Elaboración propia.

Como se observa en la Figura 33, los gastos de ART reportados por SACMEX 2014 y PUMA 2014, mantienen al sistema lacustre en los estados B y C, próximos a rebasar la frontera de lo denominado como *Desierto Lacustre*. Retomando lo propuesto en el subcapítulo 1.4 del presente documento, este acercamiento es interpretado como una disminución de la cuenca

de atracción, generando la posibilidad de que el sistema cambie repentinamente a la condición denominada como *Desierto Lacustre*.

Con los datos reportados por SACMEX 2014, se observa que los 84,240 m³/día de ART que ingresan al sistema lacustre (*Estado B*), no son suficientes para mantener tiempos de residencia por debajo de los 31 días, bajo condiciones de *estrés hídrico* (Tabla 25, Figuras 24 a 26). Por lo tanto se puede establecer que dichos aportes son insuficientes obligando a plantearse la necesidad de reforzar la operación de las PTAR.

Esta situación se agrava con lo reportado por PUMA, 2014, donde se observa que de los 17,255 m³/día que ingresan no son suficientes para reponer el agua que se pierde por evaporación natural y consumo agrícola (*Estado C*) (Tabla 26, Figuras 27 a 29).

Sin embargo, es necesario reconocer que el indicador propuesto no considera los aportes de agua de otras fuentes, y su aplicación se concentra en la temporada de estiaje. Por lo tanto se deja fuera el agua pluvial que podría ingresar al sistema en temporada de lluvias, durante los meses de junio a septiembre.

De presentarse el cambio de estado a *Desierto Lacustre*, se corre el riesgo de perder la derrama económica generada por la actividad turística de paseo en trajinera, monto estimado en \$442.6 millones al año. Asimismo la desaparición del recurso hídrico involucraría el costo de sustitución por fuentes alternas, valorado en \$64.3 millones, monto que tendría que ser absorbido por los agricultores para poder continuar desarrollando su actividad.

Asimismo con dicha transformación se induce la disponibilidad de suelo urbanizable, perdiéndose permanentemente su aptitud lacustre. Es necesario considerar que la zona está inmersa dentro de la mancha urbana de la ciudad de México y colinda con el anillo periférico, una de las principales vías de movilidad de la ciudad. Situación que le otorga un alto potencial de ser urbanizado, tanto por la vía formal como informal. Sumado a esto, a sus alrededores existe una alta demanda de suelo urbanizable para construcción de vivienda.

Como se estimó en la Figura 10 del presente documento, en la superficie actual de la zona lacustre se podrían construir 81,500 viviendas llegando a albergar a cerca de 408,000 personas (tomando como referente la densidad media de los alrededores y el promedio de

habitantes por vivienda). Volumen de población que demandaría servicios de salud, educación, seguridad, etc., incurriendo en costos presupuestales superiores a los de mantener actualmente las PTAR's.

Por el contrario, con el escenario propuesto de operar las PTAR (Cerro de la Estrella, San Lorenzo y San Luis Tlaxialtelco) al 100% de su capacidad de diseño (*Estado A, Potencial SACMEX*), aportando a la zona lacustre un estimado de 276,000 m³/día, el tiempo de residencia disminuye a 13 días promedio (Tabla 27). Sin embargo para lograr el *Estado A*, caracterizado por mantener tiempos de residencia inferiores a un mes, es necesario invertir un monto estimado en \$186.8 millones. Cantidad que representa el 35% del valor económico del recurso hídrico artificial estimado en el presente documento (estimado en \$506.9 millones al año, Capítulo 2).

Asimismo se reconoce que es necesario profundizar en el detalle del análisis del funcionamiento hídrico de la zona de canales. Como también el contar con un registro más extenso y detallado de los 16 puntos de ingreso de ART, para conocer el comportamiento diario, mensual y estacional a lo largo del año. Con una mayor cantidad de información se podría buscar un punto de equilibrio entre los porcentajes de operación de las PTARs y sus costos de operación asociados, para mantener un estado favorable del sistema lacustre a lo largo del año, ya que como se vio en el Capítulo 1, la demanda del recurso hídrico es variable a lo largo del año.

Relacionado con el apartado anterior, es necesario instrumentar los puntos de entrega de ART con el objetivo de mantener mediciones constantes que permitan conocer con mayor precisión su comportamiento, así como el monitoreo de la calidad de agua entregada. Existe una amplia diferencia entre los caudales reportados por fuentes oficiales y las académicas; mientras que SACMEX, 2014 reporta que entrega un gasto de 975 l/s, PUMA, 2014 reporta un gasto medido de 199.71 l/s (el 20% de lo reportado por SACMEX, 2014). Situación que obliga a pensar en temas de instrumentación permanente para evitar discrepancias tan marcadas.

Finalmente una estrategia interesante para dotar de protagonismo al agua residual tratada es visibilizar los puntos de entrega. Para lo cuál sería necesaria la construcción de estructuras

arquitectónicas en los 15 sitios con una temática referente al agua, como ejemplo de esto se tiene el Cárcamo de Dolores, figura 34. Generando con ello un atractivo turístico y paisajístico con el potencial de surgir hitos urbanos. Con estas acciones se pretende dotar de protagonismo y reconocimiento social de la importancia del ART como recurso hídrico artificial para la zona Lacustre de Xochimilco.



Figura 34. Cárcamo de Dolores, Chapultepec Ciudad de México.

5. Conclusiones.

- a) El indicador propuesto de sostenibilidad hídrica cumple su objetivo principal de estimar el número de días que toma en temporada de estiaje sustituir el agua contenida en canales y cuerpos de agua. Dicho indicador es una simplificación del sistema lacustre, por lo que para incrementar su precisión se deberán incrementar las mediciones de variables del ciclo hidrológico que complementen el balance hidrodinámico, el cual puede complementarse mediante modelaciones de la dinámica fluvial de los canales.
- b) Los resultados obtenidos al aplicar el criterio de sostenibilidad, dejan en claro la importancia que tiene el volumen entregado de ART con el estado que guarda el sistema lacustre de Xochimilco. Es importante invertir en el mantenimiento y rehabilitación de las PTAR's para incrementar su capacidad a un 100%. No necesariamente se requiere de la construcción de nuevas PTAR's, sino de la rehabilitación de las existentes para que operen a su capacidad de diseño. También es necesario extender la red de drenaje sanitario para eliminar las descargas clandestinas existentes dentro de la poligonal de estudio.
- c) Con el presente trabajo se sienta un precedente más en materia de políticas enfocadas a considerar la dotación de agua residual tratada, como estrategia ambiental, económica y social viable. En el modelo planteado se observó que los beneficios económicos son superiores a los gastos que conlleva la operación de las PTARs, dado que el recurso hídrico generado por éstas tiene un segundo uso en beneficio de la población, y que en el escenario de llevar las PTARs a sus condiciones de diseño, duplicando el presupuesto actual, representaría un gasto anual estimado de \$186.8 millones, claramente justificado con los beneficios económicos y ambientales observados mediante el indicador propuesto.
- d) El balance entre los montos que se invierten para operar y mantener las tres Plantas de Tratamiento de Agua Residual (Cerro de la Estrella, San Lorenzo y San Luis

Tlaxialtemalco) se considera positivo. El presupuesto destinado en el año 2016 para la operación de las PATR (\$72.4 millones) representó el 14% de los beneficios estimados anualmente para la agricultura y el turismo (\$506.9 millones). Sin embargo, no solamente se generan beneficios en materia económica, socialmente la existencia de la zona lacustre representa empleos locales, evitando el desplazamiento de la población a otros sitios de la ciudad.

Referencias

- Allen, R., Pereira, L., Raes, D., & Smith, M. (2006). *Evapotranspiración del cultivo, guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. Roma, Italia: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación (FAO).
- Balvanera, P., Castillo, A., Lazos Chavero, E., Caballero, K., Quijas, S., Flores, A., . . . Sarukán, J. (2011). *Marcos conceptuales interdisciplinarios para el estudio de los servicios ecosistémicos en América Latina*. En: Lathera, P. (ed.). *Valoración de servicios ecosistémicos. Conceptos, herramientas y aplicaciones para el ordenamiento territorial* (pp. 39-67). Buenos Aires, Argentina: Ediciones Inta.
- Comisión de Recursos Naturales (CORENA). (2011). *Programa de manejo del área natural protegida. Ejidos de Xochimilco y San Gregorio Atlapulco*. México: Secretaría de Medio Ambiente.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2015). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Zona Metropolitana de la Cd. de México (0901)*. Ciudad de México, México: Diario Oficial de la Federación (DOF: 20 abril 2015).
- Congreso de los Estados Unidos Mexicanos. (1992). *Ley de Aguas Nacionales [Ley 018] Artículo 3*. México: Diario Oficial de la Federación (DOF: 24 marzo 2016).
- Consejo Nacional de Población (CONAPO). (2012). *Delimitación de zonas metropolitanas de México 2010*. México: Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL).
- Daily, G. (1997). *Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems*. Washington, DC.: Island Press.
- Diario Oficial de la Federación (DOF). (1992). *Declaratoria que establece como zona prioritaria de preservación y conservación del equilibrio ecológico y se declara como área natural protegida, bajo la categoría de zona sujeta a conservación ecológica, la superficie que se indica de los ejidos de Xoch*. México: Diario Oficial de la Federación (DOF) 7 mayo 1992.
- García, L. A. (2015). *Propuesta metodológica para la introducción de sistemas de reusó de agua en México. (Tesis de Licenciatura)*. Ciudad de México, México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Gracia Sánchez, J. (2002). *Introducción al diseño de Zonas de Riego y Drenaje*. Ciudad de México: Instituto de Ingeniería de la UNAM (IIUNAM).
- Instituto de Ingeniería, UNAM (IIUNAM). (2012). *Primer informe de validación en campo, Zona lacustre ejidos de Xochimilco y San Gregorio Atlapulco*. Ciudad de México, México: Instituto de Ingeniería, UNAM (IIUNAM).

- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). (2006). *Extractor rápido de información climatológica (ERIC III) "software"*. México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA).
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2012). *Sistema para la consulta de información censal (SCINCE). Consulta en línea*. Obtenido de Censo de Población y vivienda 2010.: <http://gaia.inegi.org.mx/scince2/viewer.html>
- Kunz Bolaños, I. (2003). *Usos de suelo y territorio. Tipos y lógicas de localización en la Ciudad de México*. Ciudad de México, México: Plaza y Valdés.
- Millennium Ecosystem Assessment. (2005). *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*. Washington, DC: Island Press.
- Programa Universitario de Medio Ambiente, UNAM (PUMA). (2014). *Análisis del estado de conservación ecológica del sistema lacustre chinampero de la superficie reconocida por la UNESCO como Sitio Patrimonio de la Humanidad en Xochimilco, Tláhuac y Milpa Alta*. Ciudad de México, México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Riveros, B. (2013). *Tratamiento de Aguas Residuales Municipales en la Ciudad de México (Tesis de Licenciatura)*. Ciudad de México, México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Scheffer, M., & Carpenter, S. R. (2003). Catastrophic regime shifts in ecosystems: linking theory to observation. *TRENDS in Ecology and Evolution Vol. 18 No. 12*, 648-656.
- Sokolov, A., & Chapman, T. (1981). *Métodos de cálculo del balance hídrico. Guía internacional de investigación y métodos*. Madrid, España: Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura.