

Jessica Paola Martínez Pérez

Gestión de aguas residuales en una
microcuenca periurbana

2019



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ciencias Naturales

Gestión de aguas residuales en una microcuenca
periurbana

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el
Grado de

Maestría en Gestión Integrada de Cuencas

Presenta

Jessica Paola Martínez Pérez

Dirigida por:

Dr. Raúl Francisco Pineda López

Querétaro, Qro. a 21 de octubre de 2019



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ciencias Naturales
Maestría en Gestión Integrada de Cuencas

Gestión de aguas residuales en una microcuenca periurbana

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de:

Maestra en Gestión Integrada de Cuencas

Presenta:

Jessica Paola Martínez Pérez

Dirigida por:

Dr. Raúl Francisco Pineda López

Co-dirigida por:

Dr. Enrique Arturo Cantoral Uriza

Dr. Raúl Francisco Pineda López
Presidente

Dr. Enrique Arturo Cantoral Uriza
Secretario

Dr. Genaro García Guzmán
Vocal

MC. Alba Aurora Díaz Pereira
Suplente

Dr. José Alberto Rodríguez Morales
Suplente

Centro Universitario, Querétaro, Qro.
Septiembre 2019
México

RESUMEN

La generación de aguas residuales es una consecuencia inevitable en las cuencas hidrográficas por las actividades humanas y generalmente se emplea el sistema de alcantarillado para su eliminación. Sin embargo, no se contempla el saneamiento de aguas residuales, descargándose directamente sobre los cauces, alterando la estructura y funcionamiento de la cuenca. En la presente investigación se valoró el deterioro ambiental por descargas de aguas residuales domésticas en una unidad de escurrimiento de la microcuenca Buenavista. Para conocer el tratamiento y disposición final del agua residual se realizaron entrevistas semiestructuradas a actores clave de la microcuenca; también se caracterizó el efluente de la comunidad La Carbonera, para tener una idea general de la carga de contaminantes del agua residual doméstica hacia la microcuenca Buenavista; finalmente, para verificar las afectaciones en el suelo se muestreó una parcela agrícola donde se descargan aguas residuales y un suelo testigo. Se encontró que en la microcuenca Buenavista no existen sistemas eficientes para el tratamiento de aguas residuales, ocasionando el incremento de sales en el suelo y afectando a la presa Santa Catarina como vaso receptor de la microcuenca. Para resolver esta problemática, se diseñó un sistema de depuración basado en un reactor anaerobio con deflectores como tratamiento primario, seguido de un humedal artificial subsuperficial de flujo horizontal para dar tratamiento secundario y finalmente como tratamiento terciario una laguna de maduración aeróbica. Se implementó a escala piloto el sistema de tratamiento propuesto; los resultados de la eficiencia de remoción fueron mayores al 85%, siendo una alternativa para la depuración de aguas residuales en comunidades rurales y periurbanas.

Palabras clave: Gestión, aguas residuales, sistemas de tratamiento, microcuenca.

ABSTRACT

The generation of wastewater is an inevitable consequence in the watersheds due to human activities and the sewerage system is generally used for its disposal. However, wastewater sanitation is not contemplated, discharging directly over the channels, altering the structure and functioning of the basin. In the present investigation the environmental deterioration was assessed by domestic wastewater discharges in a runoff unit of the Buenavista microbasin. To know the treatment and final disposal of wastewater, semi-structured interviews were conducted with key actors in the microbasin; the effluent from the La Carbonera community was also characterized, to have a general idea of the pollutant load of domestic wastewater into the Buenavista microbasin; finally, to verify the effects on the soil, an agricultural plot was sampled where sewage is discharged and a control soil. It was found that in the Buenavista microbasin there are no efficient systems for the treatment of wastewater, causing the increase of salts in the soil and affecting the Santa Catarina dam as a receiving vessel for the microbasin. To solve this problem, a purification system based on an anaerobic reactor with baffles was designed as a primary treatment, followed by a subsurface artificial wetland with horizontal flow to give secondary treatment and finally as a tertiary treatment an aerobic maturation lagoon. The proposed treatment system was implemented at a pilot scale; Removal efficiency results were greater than 85%, being an alternative for wastewater treatment in rural and peri-urban communities.

Keywords: Management, wastewater, treatment systems, microbasin.

DEDICATORIAS

A mi mamá (mi Alma), todos mis pequeños logros han sido gracias a ti, a tu apoyo y confianza, agradezco infinitamente al universo por cruzar nuestras vidas, te amo.

A mis hermanas: Ixchel y Vane, que me han dado el mejor regalo, mis sobrinos, que me llenan de alegría y me sacan una sonrisa hasta en momentos difíciles.

Dirección General de Bibliotecas UAQ

AGRADECIMIENTOS

Especialmente al Dr. Enrique Cantoral y a la Mtra. Liliana González Erives, por ser los primeros que creyeron en mí para elaborar este trabajo, por su apoyo, su atención y sus valiosas aportaciones.

Al Dr. Raúl Pineda, no solo por la dirección de este trabajo, sino también por la confianza y el apoyo brindado en todo este tiempo, sin su apoyo no hubiera sido posible la culminación de este trabajo.

A la Mtra. Alba Díaz Pereira y a su equipo de trabajo por su constante apoyo en el laboratorio para la realización de los análisis de suelo y agua.

Al Dr. Genaro García Guzmán por aceptar ser parte de mis sinodales y por su valiosa aportación en la parte social de mi trabajo.

Al Dr. José Alberto Rodríguez Morales por aceptarme de movilidad académica y por su valiosa ayuda en el desarrollo del sistema de tratamiento.

Al Dr. Juan Alfredo Hernández Guerrero por el tiempo que dedicó a la revisión de este trabajo, a pesar de no formar parte del comité evaluador, y por su orientación en todos los trámites administrativos requeridos en la maestría.

Gracias al Sr. Carmen por su apoyo en los muestreos, su disponibilidad e interés en este trabajo.

A mis profesores y compañeros de la Maestría en Gestión Integrada de Cuencas, especialmente a Julio Sánchez por su apoyo intelectual y moral a lo largo de este recorrido.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología y a la Universidad Autónoma de Querétaro, porque sin su apoyo no hubiese sido posible realizar los estudios de maestría ni elaborar este trabajo.

ÍNDICE

RESUMEN.....	III
ABSTRACT.....	IV
AGRADECIMIENTOS.....	VI
ÍNDICE.....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	X
ÍNDICE DE TABLAS.....	XII
INTRODUCCIÓN.....	1
JUSTIFICACIÓN.....	4
PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN.....	5
OBJETIVOS.....	6
OBJETIVO GENERAL.....	6
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	6
RESUMEN CAPITULAR.....	7
CAPÍTULO 1. GESTIÓN DE CUENCAS Y AGUAS RESIDUALES.....	9
1.1 Aguas Residuales.....	10
1.1.1 <i>Reúso de Aguas Residuales</i>	12
1.2 Sistemas de Tratamiento.....	13
1.2.1 <i>Los Humedales Artificiales como una alternativa no convencional para el aprovechamiento de aguas residuales</i>	16
Consideraciones finales.....	17
CAPÍTULO 2. SANEAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES.....	19
2.1 Saneamiento de aguas residuales en México.....	19
2.2 Técnicas de tratamiento de aguas residuales en México.....	21
2.3 Los humedales artificiales como sistemas de tratamiento.....	23
2.3.1 <i>Experiencias internacionales</i>	24
2.3.2 <i>Experiencias nacionales</i>	24
Consideraciones finales.....	26
CAPÍTULO 3. MICROCUENCA BUENAVISTA.....	27

3.1	Uso de suelo y vegetación.....	28
3.1.1	<i>Aspectos Socioeconómicos.....</i>	29
3.2	Edafología	30
3.3	Hidrología	31
	Consideraciones finales.....	32
CAPÍTULO 4. MÉTODOS Y HERRAMIENTAS		33
4.1	Proceso metodológico	33
4.1.1	<i>Disposición final de las aguas residuales domiciliarias de la microcuenca Buenavista.....</i>	34
4.1.2	<i>Conocer la calidad del agua residual doméstica</i>	35
4.1.3	<i>Diagnosticar la descarga de aguas residuales en suelos de una unidad de escurrimiento.....</i>	37
4.1.4	<i>Diseñar el sistema de tratamiento no convencional</i>	38
CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....		42
5.1	Disposición final de las aguas residuales domiciliarias de la microcuenca Buenavista.....	42
5.1.1	<i>Manejo de aguas residuales en La Carbonera.....</i>	51
5.2	Conocer la calidad del agua residual doméstica	54
5.3	Diagnosticar la descarga de aguas residuales en suelos de una unidad de escurrimiento	58
5.4	Diseñar el sistema de tratamiento no convencional.....	61
5.4.1	<i>Tratamiento primario (reactor anaerobio con deflectores).....</i>	62
5.4.2	<i>Tratamiento secundario (humedal artificial subsuperficial de flujo horizontal).....</i>	65
5.4.3	<i>Tratamiento terciario (laguna de maduración aeróbica)</i>	67
5.5	Prototipo sistema de tratamiento	71
5.5.1	<i>Descripción del sistema de tratamiento.....</i>	71
5.5.2	<i>Sustrato</i>	72
5.5.3	<i>Vegetación</i>	73
5.5.4	<i>Evaluación de la eficiencia de remoción de contaminantes</i>	74
CAPÍTULO 6. EVALUACIÓN ECONÓMICA DE SISTEMAS DE TRATAMIENTO		77

6.1 Costos de una planta de tratamiento convencional	77
6.1.1 Costos de construcción	78
6.1.2 Costos de operación y mantenimiento	78
6.2 Costos de una planta de tratamiento no convencional	79
6.2.1 Costos de construcción	79
6.2.2 Costos de operación y mantenimiento	80
6.3 Costos de ecotecnias para el manejo de aguas residuales	80
6.3.1 Costos de construcción	81
6.3.2 Costos de operación y mantenimiento	81
6.4 Extrapolación de costos a la microcuenca.....	82
Consideraciones finales.....	87
CONCLUSIONES	88
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	91
ANEXOS.....	98

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Localización de la microcuenca Buenavista. Fuente: Elaboración a partir de datos del INEGI (2017).	27
Figura 2. Zonas funcionales de la microcuenca Buenavista, que muestra la ubicación de la localidad La Carbonera. Fuente: Elaboración a partir de la Red Hidrográfica Nacional, INEGI (2017).....	28
Figura 3. Uso de suelo y vegetación de la microcuenca Buenavista. Fuente: Elaboración a partir de la Carta de Uso de Suelo y Vegetación Serie VI, INEGI (2017)	29
Figura 4. Mapa de edafología de la microcuenca Buenavista. Fuente: Elaboración a partir de la Carta Edafológica Serie II, INEGI (2013).	30
Figura 5. Mapa de escurrimiento de la microcuenca Buenavista. Fuente: Elaboración a partir de la Red Hidrográfica Nacional, INEGI (2017).	31
Figura 6. Descripción del proceso metodológico. Fuente: Elaboración propia.	33
Figura 7. Aplicación de entrevista a informantes claves. Foto de Julio Sánchez (2018).	34
Figura 8. Toma de muestra y análisis in situ de las aguas residuales. Fotos de Julio Sánchez (2018).....	36
Figura 9. Toma de muestra de suelo. Foto de Paola Martínez (2018).....	37
Figura 10. Descarga de aguas residuales en calles de la microcuenca Buenavista. Fotos de Julio Sánchez (2018).	43
Figura 11. Ubicación espacial de la disposición final de aguas residuales domésticas. Fuente: Elaboración a partir de Google Earth (2018).	44
Figura 12. Desbordamiento de aguas residuales de las fosas sépticas y descarga de aguas residuales en la presa Santa Catarina. Fotos de Paola Martínez (2018).	47
Figura 13. Desviación y uso del agua residual en el riego agrícola. Fotos de Paola Martínez (2018).....	49

Figura 14. Esguerrimiento de aguas residuales en La Carbonera. Foto de Paola Martínez (2018).....	52
Figura 15. Métodos utilizados para la evacuación de las aguas residuales en La Carbonera.....	52
Figura 16. Degradación de suelo por descarga de aguas residuales. Foto de Paola Martínez (2018).....	60
Figura 17. Posición relativa del sistema de tratamiento. Fuente: Elaboración propia.	62
Figura 18. Reactor anaerobio con deflectores como tratamiento primario. Fuente: Elaboración a partir de información de Tilley (2011).....	63
Figura 19. Humedal artificial subsuperficial de flujo horizontal como tratamiento secundario. Fuente: Elaboración a partir de información de Tilley (2011).	65
Figura 20. Laguna de maduración como tratamiento secundario. Fuente: Elaboración a partir de información de Tilley (2011).....	67
Figura 21. Sistema de tratamiento y disposición final del agua residual para riego agrícola en La Carbonera. Fuente: Elaboración a partir de la evaluación del terreno.	70
Figura 22. Inoculación de lodo residual. Foto de Paola Martínez (2019).	71
Figura 23. Instalación del sistema de tratamiento. Foto de Paola Martínez (2019).	72
Figura 24. Acondicionamiento de los módulos con el sustrato. Foto de Paola Martínez (2019).....	73
Figura 25. Acondicionamiento de módulos con la vegetación. Foto de Paola Martínez (2019).....	73
Figura 26. Comparación de costos de los sistemas de tratamiento por habitante.	83
Figura 27. Implementación de sistemas de tratamiento por localidades. Fuente: Elaboración a partir de la Red Hidrográfica Nacional, INEGI (2017).	86

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Contaminantes de importancia en el tratamiento del agua residual y sus efectos.	11
Tabla 2. Comparación de los sistemas naturales y los sistemas convencionales.	16
Tabla 3. Comparación entre humedales artificiales de acuerdo con el sistema de flujo.	18
Tabla 4. Procesos de tratamiento de aguas residuales municipales.	22
Tabla 5. Ecuación básica para calcular el caudal del sistema de tratamiento.	38
Tabla 6. Modelos matemáticos para el diseño del reactor anaerobio con deflectores.	39
Tabla 7. Materiales empleados en el diseño y construcción de humedales horizontales.	39
Tabla 8. Modelos matemáticos para el diseño del humedal artificial subsuperficial de flujo horizontal.	40
Tabla 9. Cálculo relación Largo- Ancho del humedal artificial subsuperficial de flujo horizontal.	40
Tabla 10. Modelos matemáticos para el diseño de la laguna de maduración aeróbica.	41
Tabla 11. Aspectos demográficos y cobertura de drenaje por localidades.	42
Tabla 12. Descarga y uso de aguas residuales en las localidades de la microcuenca Buenavista.	45
Tabla 13. Resultados de laboratorio de las aguas residuales de la comunidad La Carbonera, en época de estiaje.	54
Tabla 14. Resultados de laboratorio de las aguas residuales de la comunidad La Carbonera, en época de lluvia.	55
Tabla 15. Resultados del análisis del suelo en La Carbonera.	58
Tabla 16. Cálculo del caudal para el diseño del sistema de tratamiento.	62
Tabla 17. Cálculo del volumen útil del tratamiento primario.	63
Tabla 18. Cálculo de las dimensiones del tratamiento primario.	64

Tabla 19. Dimensiones asumidas para el reactor anaerobio con deflectores.....	64
Tabla 20. Parámetros de diseño del humedal artificial subsuperficial de flujo horizontal.....	66
Tabla 21. Cálculo de las dimensiones del humedal artificial subsuperficial de flujo horizontal.....	66
Tabla 22. Dimensiones asumidas del humedal artificial subsuperficial de flujo horizontal.....	67
Tabla 23. Cálculo de las dimensiones de la laguna de maduración aeróbica.....	68
Tabla 24. Dimensiones asumidas de la laguna de maduración aeróbica.....	68
Tabla 25. Actividades de la operación normal de una planta de tratamiento de lodos activados modalidad aireación extendida.....	79
Tabla 26. Actividades de la operación normal del sistema de tratamiento no convencional.....	80
Tabla 27. Estimación de costos de construcción de los sistemas de tratamiento para cada una de las localidades de la microcuenca Buenavista.....	82
Tabla 28. Estimación de costos de mantenimiento y operación de los sistemas de tratamiento para cada una de las localidades de la microcuenca Buenavista.....	83

INTRODUCCIÓN

La generación de aguas residuales es una consecuencia inevitable en las cuencas hidrográficas por las actividades humanas, por consiguiente, el uso del sistema de alcantarillado es cada vez más común en comunidades rurales y periurbanas como medio de eliminación de aguas grises y negras. Sin embargo, el sistema de saneamiento sólo contempla la red de alcantarillado y generalmente las aguas residuales se vierten directamente sobre los cauces (Menchaca y Lozada, 2017).

El recurso hídrico, considerado como eje de interacción entre los elementos naturales y las actividades humanas, es uno de los recursos naturales más afectado por el mal manejo de las cuencas hidrográficas, debido principalmente a prácticas antrópicas inadecuadas que generan el ingreso de contaminantes a cuerpos de agua, ríos y arroyos, los cuales han servido como medio de eliminación de aguas residuales (Solano, 2011).

De acuerdo con el Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos (WWDR por sus siglas en inglés) (2017), el aumento de la población y la carencia de un sistema de alcantarillado que integre el saneamiento de las aguas residuales, ha ocasionado el deterioro de la calidad del agua. Como resultado de su contaminación, muchos ecosistemas dulceacuícolas muestran signos evidentes de degradación, dificultando su uso e imposibilitando además que cumpla su función ecológica, perdiendo, en algunos casos de manera irremediable, su biodiversidad.

En México, el aumento de la población provoca mayor demanda de agua, servicios de recolección y tratamiento de aguas residuales (Carabias, 2005). A nivel estatal, de acuerdo con la Encuesta Intercensal 2005, la población en Querétaro era de 1, 598,139 y para el 2010 aumentó a 1, 827,937. Este incremento se refleja en la cobertura de drenaje, pasando de 302,913 viviendas que contaban con el servicio en el 2005 a 409,186 en el 2010.

Este incremento no se refleja en la depuración de aguas residuales, a pesar que le compete a la Comisión Estatal del Agua (CEA) no es un tema que se atienda de forma prioritaria, en el estado de Querétaro únicamente se cuenta con 51 plantas de tratamiento (CONAGUA, 2017), y muchas de ellas no se encuentran en operación o su capacidad de tratamiento ha sido rebasada.

Cabe destacar que los sistemas no convencionales (*in situ*) como las fosas sépticas, son los más utilizados por la política pública para viviendas individuales, comunidades dispersas, de baja densidad, zonas rurales y periurbanas. Sin embargo, en la mayoría de los casos los sistemas se dejan en el abandono y no se les da mantenimiento, generando la pérdida de su capacidad de remoción de contaminantes y el desbordamiento de las aguas residuales (WWDR, 2017). Es importante mencionar que las fosas sépticas únicamente dan un tratamiento primario a las aguas residuales (Tilley, 2011).

A escalas menores también se presenta el mismo escenario, el Plan Rector de Producción y Conservación (2007) de la microcuenca Buenavista menciona que debido al crecimiento poblacional el requerimiento de servicios públicos se ha ido acentuando, lo cual queda manifestado en las peticiones de los habitantes, siendo la instalación y ampliación de agua potable, red de drenaje y sistemas de tratamiento de aguas residuales los servicios prioritarios en la mayoría de las comunidades.

La microcuenca Buenavista tiene una población de 22,860 habitantes; se ubica en la zona norte de la ciudad de Querétaro y comprende dieciocho localidades, de las cuales quince son rurales. De acuerdo al censo poblacional 2010, la población creció 11% respecto al 2005 (20,305 habitantes); mientras que, los servicios de drenaje y agua potable incrementaron 15% y 6% respectivamente.

Durante un primer acercamiento a las localidades de la microcuenca Buenavista, se pudo observar que el alcantarillado público no tiene la infraestructura adecuada y suficiente para el almacenamiento y tratamiento de las aguas

residuales; provocando el escurrimiento, evaporación e infiltración por calles alledañas y campos de cultivos, situación que aumenta el riesgo de acumulación de sales en el suelo y la contaminación de los cuerpos de agua.

En general, en la microcuenca Buenavista se carece de un sistema de alcantarillado eficiente, debido a que la política pública ha optado por la implementación de tanques sépticos como único tratamiento de aguas servidas, provocando que la disposición final de las mismas se haga directamente sobre el suelo y cuerpos de agua, como es el caso de la presa Santa Catarina en donde se desarrolla la piscicultura, presentando signos evidentes de alteración de la química del agua.

Es por ello que surge la necesidad de buscar alternativas tecnológicas de tratamiento de aguas residuales que sean de bajo costo y de requerimientos sencillos de operación y mantenimiento. Es decir, que sean acordes a la realidad de los sectores periurbanos y rurales, donde la gestión de estas aguas se ha convertido en una demanda cada vez más urgente y que requiere una pronta respuesta.

Al respecto, los humedales artificiales representan una buena alternativa para la depuración de aguas residuales en comunidades rurales y periurbanas, contrarrestando los problemas socio-ambientales generados por la falta de manejo de las aguas residuales (Gay, 2008).

Con relación a lo anterior, se propone el diseño de un sistema de tratamiento basado en un humedal artificial en una unidad de escurrimiento, cuyo uso pueda extrapolarse a la microcuenca Buenavista, logrando disminuir las descargas de aguas residuales crudas, permitiendo la recuperación de los cuerpos de aguas contaminados, además del aprovechamiento del agua residual tratada en la agricultura, sin poner en riesgo las funciones hidrodinámicas del suelo debido a la acumulación de sodio.

La gestión del agua residual generada en la microcuenca Buenavista permitiría la producción de agua limpia para abastecer los cauces que alimentan a la presa Santa Catarina, recuperando la calidad del agua que sustenta la vida acuática y con ello el aumento del turismo ecológico, trayendo un impacto económico positivo para los habitantes circundantes.

JUSTIFICACIÓN

La problemática que actualmente presenta la microcuenca Buenavista es el resultado de la falta de gestión política y administrativa de las aguas residuales por parte de los actores políticos y locales. La deficiencia del sistema de alcantarillado provoca el ingreso de nutrientes, elementos tóxicos y microorganismos en el suelo y agua, lo que favorece condiciones de vulnerabilidad para la flora, fauna y la población asentada en sus alrededores en cuanto a la salud; convirtiéndose en un problema de salud pública a corto y mediano plazo.

La contaminación de suelo y agua por descargas de aguas residuales repercute en los procesos naturales de infiltración y escurrimiento superficial de la microcuenca Buenavista. Además, los escurrimientos del agua residual de la cuenca alta y media, establecen una condición específica de riesgo en la presa Santa Catarina como vaso receptor de la microcuenca, en donde se desarrolla la piscicultura para venta y autoconsumo. Esta situación establece la necesidad de desarrollar mecanismos de gestión dirigidos a establecer una cultura local del cuidado del agua, mediante el tratamiento de aguas residuales por procedimientos naturales.

Aunado a lo anterior, se pretende realizar el diseño de un humedal artificial en una unidad de escurrimiento, que servirá como ejemplo de eco-tecnología funcional en la depuración de aguas residuales en comunidades rurales y periurbanas para las instancias municipales encargadas de la red de alcantarillado y saneamiento de aguas, así como para la población interesada en la reutilización del agua residual, debido a su bajo costo de operación y mantenimiento en

comparación con las plantas de tratamiento convencionales, y a su alta capacidad de remoción de contaminantes.

La investigación permitirá conocer la cobertura actual del sistema de alcantarillado público, así como las formas de desalojo y tratamiento de aguas residuales utilizado por la población que no cuenta con drenaje. Además de la identificación de los recursos naturales impactados por las descargas de aguas residuales sin tratamiento, otorgando a la población elementos de juicios para gestionar la depuración de sus aguas residuales.

PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

Para abordar la problemática identificada en la microcuenca Buenavista y buscar alternativas acordes a su realidad, se plantean las siguientes preguntas de investigación:

¿Cuál es la disposición final de las aguas residuales dentro de la microcuenca Buenavista y qué tratamiento se les da actualmente?

¿Cuál es el nivel de contaminación que presentan las aguas residuales domésticas de la microcuenca?

¿Las descargas de agua residual, sin tratamiento, está provocando la contaminación y deterioro del suelo en una unidad de escurrimiento de la microcuenca?

¿El sistema de tratamiento propuesto es suficiente para tratar las descargas y mejorar la calidad del agua que posibilite poder reutilizarla?

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Valorar el deterioro ambiental por las descargas de aguas residuales domésticas en una unidad de escurrimiento de la microcuenca Buenavista, y diseñar un humedal artificial que permita depurar los contaminantes y cuyo uso pueda extrapolarse a la microcuenca.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- I. Conocer la disposición final de las aguas residuales domésticas de la microcuenca Buenavista.
- II. Determinar la calidad del agua residual domiciliaria en una unidad de escurrimiento de la microcuenca Buenavista.
- III. Diagnosticar la descarga de aguas residuales en suelos de una unidad de escurrimiento para disponer de un humedal artificial como sistema de tratamiento.
- IV. Diseñar un humedal artificial como una alternativa eco-tecnológica que pueda extrapolarse a la microcuenca.

RESUMEN CAPITULAR

Capítulo 1. Se presentan los conceptos teóricos que guiarán la investigación y que están relacionados con las aguas residuales, los sistemas de tratamiento y las unidades de estudio que se abordarán, por ello es conveniente comenzar con las perspectivas que diversos autores manejan sobre la gestión de cuencas. Posteriormente se abordan los sistemas de tratamiento empleados por la política pública para el tratamiento de aguas residuales en el sector rural y periurbano. Finalmente se ahonda en los humedales artificiales como una técnica ecológica para la depuración de aguas residuales.

Capítulo 2. Como antecedentes, se plantea la cobertura de los servicios de alcantarillado público para la recolección de las aguas residuales y su subsecuente saneamiento a nivel nacional; iniciando con las técnicas de tratamiento más usadas. Además, se abordan los humedales artificiales como el sistema de tratamiento apto para las aguas residuales en zonas de baja densidad poblacional y se fortalece con casos de estudios a nivel nacional e internacional.

Capítulo 3. En este apartado se presentan las características físicas, morfológicas, usos de suelo y vegetación, además de las actividades socioeconómicas. Con el fin de mostrar los elementos con los que cuenta la microcuenca, para así poder establecer el comportamiento de las aguas residuales, entender los problemas ocasionados por las mismas y conocer las aptitudes de la zona de estudio para la implementación de un humedal artificial.

Capítulo 4. Se describen detalladamente los métodos y herramientas utilizados en el desarrollo de la investigación, como son las entrevistas semiestructuradas e informales, recorridos de campo, caracterización de las aguas residuales domésticas, caracterización del suelo con descarga de aguas residuales y el diseño del sistema de tratamiento propuesto.

Capítulo 5. Aquí se exhiben los resultados obtenidos a partir de la aplicación de la metodología. Se muestran tablas, mapas y fotografías que acotan la problemática generada por la falta de manejo de aguas residuales en todas las comunidades de la microcuenca Buenavista. A partir de los resultados obtenidos se presenta el diseño del sistema de tratamiento acorde a las características de la zona de estudio.

Capítulo 6. En este apartado se presenta la evaluación económica de tres tecnologías aplicadas en el saneamiento de las aguas residuales, abordando los costos de construcción, operación y mantenimiento. Con la finalidad de determinar la opción más viable para el manejo de aguas residuales en las comunidades rurales y periurbanas, desde el punto de vista económico-ambiental.

CAPÍTULO 1. GESTIÓN DE CUENCAS Y AGUAS RESIDUALES

De acuerdo con Solano (2011), la gestión integrada de cuencas considera el potencial y las necesidades de manejo de los recursos naturales en una forma ambientalmente sustentable, donde el agua es el recurso considerado como eje de articulación de los recursos naturales con las actividades humanas.

Bajo este enfoque, la gestión de una cuenca se vislumbra como una actividad mixta, vinculada al manejo y conservación de todos los elementos y recursos naturales, así como a la gestión específica del agua. Actualmente se visualiza como un enfoque multidisciplinario, Santiago (2017) afirma:

La gestión integrada de cuencas permite el manejo de un territorio y el planteamiento de acciones integrales para la búsqueda del desarrollo social que considera las dinámicas y relaciones socioeconómicas; las características biofísicas y políticas del territorio; el impacto ambiental que resulta del manejo de los recursos naturales y las acciones de gestión de un entorno natural para enfrentar el deterioro ambiental. (p.45)

La unidad de análisis de la Gestión Integrada de Cuencas es la cuenca hidrográfica, definida como un “sistema continuo” de clima, suelos, cobertura vegetal, hábitats, red de drenaje, sistemas de producción y con presencia humana que interactúan en el espacio y tiempo (Gaspari *et al.*, 2013).

Cuevas *et al.* (2010) refiere que las actividades humanas y la creciente demanda por bienes como alimento, vivienda, agua potable, drenaje y servicios ambientales generan constantemente una presión sobre los recursos naturales con impactos negativos sobre la estructura, funcionamiento y distribución de los mismos.

En este sentido, la generación de aguas residuales como consecuencia de las actividades domésticas, productivas e industriales que se desarrollan dentro de una cuenca; constituyen uno de los problemas primordiales para los habitantes.

Generalmente la disposición final de las aguas residuales se realiza directamente en los cuerpos de aguas superficiales y en el suelo, alterando la química del agua y provocando la salinización del suelo, por ende, se pone en riesgo su capacidad para realizar funciones, tales como producción de biomasa, purificación del agua, biodegradación de contaminantes y almacenamiento de agua (Núñez, 2015).

Para fines de manejo e identificación de áreas específicas de tratamiento se subdivide por tamaño comúnmente a la cuenca en las denominadas subcuencas que son unidades de menor jerarquía; en microcuencas y unidades de escurrimiento, definidas por unidades hidrológicas pequeñas. Para efecto de esta investigación, es esta última la que se considera más importante, debido a que facilita la participación de todos los actores en la comprensión y resolución de la problemática.

1.1 Aguas Residuales

Las aguas residuales son aquellas que han sido utilizadas por actividades humanas y que son desechadas porque ya no sirven para la higiene o consumo humano, son aguas de composición variada provenientes de las descargas domésticas, municipales, industriales, comerciales y agrícolas que se alojan en cuerpos receptores y pueden llegar a contaminar el suelo o los acuíferos (Serrano, 2005).

De acuerdo con el Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos (WWDR) (2017), las aguas residuales están compuestas aproximadamente en un 99% de agua y 1% de sólidos en suspensión, coloidales y disueltos. Aunque la composición exacta de las aguas residuales varía según las diferentes fuentes y a lo largo del tiempo, el agua sigue siendo su principal componente. En la Tabla 1 se muestran los componentes principales de las aguas residuales, así como los efectos que causan en el lugar de descarga.

Tabla 1. Contaminantes de importancia en el tratamiento del agua residual y sus efectos.

ANÁLISIS PRINCIPAL	CONTAMINANTE CONSIDERADO	EFEECTO
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)	Materia orgánica biodegradable	Agotamiento del oxígeno disuelto en cuerpo receptor y crecimiento de microorganismos.
Demanda Química de Oxígeno (DQO) o Carbono Orgánico Total (COT)	Materia orgánica total	Mismos que DBO. Acumulación en cuerpo receptor. Riesgos de toxicidad.
Sólidos Suspendidos Totales (SST), Volátiles (SSV) y Fijos (SSF)	Materia en suspensión sedimentable y no sedimentable (coloidal)	Sedimentación y azolvamiento en cuerpos receptores. Digestión y liberación de materia orgánica e inorgánica.
Nitrógeno Total Kjeldhal (NTK), Nitratos y Nitritos (NO_3 , NO_2), Fósforo total (Pt), Ortofosfatos (PO_4^{3-})	Nitrógeno y fósforo	Nutrientes que provocan eutrofización en cuerpos de agua. Contaminación de acuíferos.
Grasas y aceites	Grasas y aceites	Acumulación en drenajes y cuerpos de agua. Reducen la transferencia de oxígeno a los cuerpos de agua. Flotación de lodos. Contaminación visual.
Sólidos Disueltos Totales (SDT)	Sales inorgánicas	Restringen el uso de agua tratada.
Coliformes fecales y huevos de helmintos	Patógenos y parásitos	Transmisión de enfermedades gastrointestinales.

Fuente: WWDR (2017).

En México las descargas de aguas residuales se clasifican en municipales e industriales. Las aguas residuales municipales son las captadas en los sistemas de alcantarillado municipal urbano y rural, mientras que las aguas residuales industriales son aquéllas generadas por la industria, y que deben ser tratadas por estas mismas (Bunge, 2010).

Cualquiera que sea la clasificación de aguas residuales, debido a la gran cantidad de sustancias (algunas de ellas tóxicas) y microorganismos que portan, pueden ser causa de contaminación en lugares donde son evacuadas sin un tratamiento previo. Silva *et al.* (2008) refiere que es de suma importancia conocer y

cuantificar los componentes del agua residual para definir una estrategia de recolección y tratamiento que garantice una calidad adecuada del agua residual tratada para su uso posterior.

En este aspecto, la CONAGUA (2017) establece que la reutilización de las aguas residuales es fundamental en el ciclo del agua, tanto como una medida mitigadora de la contaminación de los cuerpos de agua, como por la disminución de los volúmenes de agua de primer uso, por lo que desde hace algunos años en México se promueve su reúso.

1.1.1 Reúso de Aguas Residuales

De acuerdo con la Ley de Aguas Nacionales, el reúso es el aprovechamiento, con o sin tratamiento previo, en actividades diferentes a las cuales fueron originadas. Los tipos y aplicaciones se clasifican de acuerdo con el sector o infraestructura que recibe el beneficio, siendo los principales: el urbano, que incluye irrigación de áreas verdes; el industrial, empleado especialmente en los sistemas de refrigeración, y el agrícola, en la irrigación de cultivos (Gutiérrez, 2003; Silva *et al.*, 2008).

La agricultura es la principal actividad donde se reusa el agua residual, sin embargo, debido a que existe una relación entre los tipos de suelo y el riesgo de salinidad por el riego de aguas residuales, el uso de este tipo de agua, sin un adecuado tratamiento, puede contribuir a la degradación de suelos (Delgadillo *et al.*, 2010); principalmente por el contenido de sales, pero también, aporta frecuentemente metales pesados, grasas y detergentes que pueden modificar la fertilidad de los suelos, volviéndolos improductivos (Núñez, 2015).

Por consiguiente, es importante conocer la textura del suelo, debido a que la acumulación de sales en los distintos suelos dependerá principalmente de las propiedades físicas de estos (Velázquez *et al.*, 2002). Las aguas residuales con fines de uso agrario deben tener ciertas exigencias en lo que se refiere a problemas

básicos de salinidad, permeabilidad, toxicidad específica por ciertos iones y contaminación desde el punto de vista sanitario (García, 1998; Andrade, 2008).

Al respecto, Díaz *et al.* (2012) refiere que, existen diversos sistemas de tratamiento de aguas residuales domésticas en donde se pretende eliminar los contaminantes hasta alcanzar los valores máximos permisibles de acuerdo a las normas y estándares nacionales e internacionales.

1.2 Sistemas de Tratamiento

El tratamiento es la actividad realizada sobre las aguas residuales para reducir sus contaminantes, tratando de recuperar su pureza o potabilidad para que pueda ser reutilizada en las diferentes actividades del ser humano (Serrano, 2005).

En virtud de la diversidad de contaminantes presentes en las aguas residuales las técnicas para tratarlas son muy amplias, las cuales consisten en una serie de tecnologías y se clasifican según su operación, en convencionales y no convencionales. Se entiende como sistemas convencionales los que se emplean en núcleos de población importantes, consumen energía eléctrica y requieren de mano de obra especializada; mientras que los no convencionales, también llamados sistemas alternativos, se desarrollan sin aporte de energía, en poblaciones pequeñas y alejadas de redes de saneamiento.

En los sistemas convencionales (*ex situ*), usados principalmente en zonas urbanas, los residuos son transportados a través de una red de alcantarillado a una planta de tratamiento; mientras que en los sistemas no convencionales (*in situ*), los residuos se acumulan en una letrina o fosa séptica. Estos últimos se usan a menudo para viviendas individuales, comunidades dispersas, de baja densidad y zonas rurales (WWDR, 2017).

Recientemente se han hecho esfuerzos por incrementar la cobertura de tratamiento de aguas residuales en México, pero estos esfuerzos se han enfocado principalmente en las localidades urbanas. De acuerdo con Lahera (2010), se ha

optado por métodos convencionales de tratamiento, en particular por el de lodos activados que requiere de un uso intensivo de productos químicos y de energía en el proceso, genera emisiones de contaminantes al aire (como amoníaco) y tiene como residuo grandes cantidades de lodos tóxicos para los que no se tienen sitios seguros de disposición final.

Estos sistemas son costosos y requieren de personal técnico capacitado para su operación y mantenimiento, además de requerir altos consumos energéticos (González *et al.*, 2011); limitando la aplicación de éstos sistemas en pequeños municipios y en zonas rurales (Garzón *et al.*, 2012).

No obstante, la gestión y administración de los sistemas de tratamiento de aguas residuales, en sector rural y periurbano, obedece en su forma de organización a un patrón en el cual los sistemas centralizados han dominado el saneamiento de las aguas residuales. Muchas veces estos sistemas dejan de lado factores ambientales, como la posibilidad de reutilización de aguas residuales y la protección de cuencas hidrográficas (Maca, 2014).

Reyna (2011) refiere que la política pública se ha centrado únicamente en desarrollar tanques sépticos para el saneamiento de aguas residuales en las localidades rurales y periurbanas; se trata de una depuración primaria. Además, se ha comprobado que estos sistemas remueven alrededor del 40% de cargas de DBO₅ y DQO, incumpliendo con lo establecido por la legislación (Villegas *et al.*, 2006; Mena, 2014). En ocasiones estos sistemas no cuentan con la capacidad ni las características necesarias para evitar la contaminación de mantos acuíferos y ante la falta de mantenimiento pierden su capacidad de remoción de contaminantes (Reyna, 2011).

Además, no existen estrategias gubernamentales que permitan evaluar la calidad después del tratamiento; como política gubernamental la calidad del agua se establece mediante los límites permisibles, cuantificados en los índices de demanda bioquímica de oxígeno a cinco días; demanda química de oxígeno y

sólidos suspendidos totales (CONAGUA, 2017); dejando sin evaluar, metales pesados y otros compuestos químicos, mismos que pueden afectar la salud de los seres humanos (Menchaca *et al.*, 2017).

A pesar de que se debe dar atención al control, reducción y tratamiento de las descargas municipales en zonas rurales y periurbanas, no existe una definición de tecnología para áreas de baja densidad poblacional o de población dispersa (Morales *et al.*, 2013). Por lo tanto, es evidente el fracaso de las políticas de desarrollo convencionales para satisfacer las necesidades básicas de la población rural, principalmente en el tratamiento de aguas residuales.

Es necesario implementar estrategias innovadoras acordes a la realidad de los sectores periurbanos y rurales, donde la gestión de estas aguas se ha convertido en una demanda cada vez más urgente y que requiere de una pronta respuesta. Internacionalmente se ha recomendado el uso de tecnologías no convencionales o naturales, también conocidos como sistemas de saneamiento ecológico, indispensables para avanzar hacia una mayor cobertura mundial (Morató *et al.*, 2006) y en coincidencia con el contexto ambiental (Tagle *et al.*, 2017).

Moreno (2009) indica: el saneamiento ecológico es una alternativa a los enfoques tradicionales de disposición de aguas residuales, los cuales se basan en la implementación sistemática del reúso y reciclaje de nutrientes y agua. Estos sistemas aseguran que el agua sea usada económicamente y reciclada de una manera segura para irrigación o recarga subterránea. (p. 4)

Por consiguiente, los sistemas no convencionales representan la mejor opción para cubrir las necesidades de depuración de aguas residuales en áreas periurbanas y rurales, pues generalmente la implementación de sistemas tecnificados (convencionales) terminan por ser abandonados debido a que los usuarios (pobladores) no cuentan con los conocimientos para la operación y mantenimiento de dichos sistemas y/o con los recursos para reponer los insumos dañados. En la Tabla 2 se hace la comparación de las ventajas y desventajas que

ofrecen las técnicas de saneamiento convencional y no convencional de aguas residuales.

Tabla 2. Comparación de los sistemas naturales y los sistemas convencionales.

SISTEMAS NATURALES	SISTEMAS CONVENCIONALES
Coste proyecto medio	Elevado coste proyecto
Bajo coste mantenimiento	Alto coste mantenimiento
Bajo o nulo consumo energético	Requiere consumo energético
No requiere personal técnico	Requiere personal técnico
Producción fangos baja o nula	Elevada producción fangos
Buena Integración en el medio	Baja integración en el medio
No genera malos olores	Producción de malos olores

Fuente: Morató *et al.* (2006).

Lo anterior expone los problemas que se enfrentan en México por la dotación de los servicios públicos y sus formas de gestión. Además, se hace evidente la diferencia entre áreas rurales y urbanas respecto al acceso a infraestructura, bienes y servicios para la satisfacción de necesidades humanas básicas. En general, la población rural en México carece de infraestructura para el acceso a agua potable y saneamiento en mayor medida que las ciudades (Ortiz *et al.*, 2014).

Además, resalta la necesidad de desarrollar una cultura local del cuidado del agua, mediante el tratamiento de aguas residuales, por procedimientos naturales que no impactan al ambiente. Al respecto, los humedales artificiales representan una tecnología natural de tratamiento de aguas residuales, de bajo precio, eco-tecnológica y biológica, diseñada con el fin de imitar los procesos de los ecosistemas de humedales naturales, se destacan como una alternativa potencial o como un sistema suplementario para el tratamiento de aguas residuales (ONU-HABITAT, 2008).

1.2.1 Los Humedales Artificiales como una alternativa no convencional para el aprovechamiento de aguas residuales

Mena (2014) hace referencia que los humedales artificiales son utilizados para tratar altas concentraciones de materia orgánica, sólidos suspendidos, patógenos y

nutrientes (nitrógeno y fósforo), los cuales están presentes en los efluentes domésticos y agrícolas. Se busca la recuperación del agua a través de tecnología, para contrarrestar los problemas ambientales y de salud, a causa del consumo o manipulación de agua de estas fuentes.

Llagas *et al.* (2006), considera que se trata de una tecnología viable para depurar aguas servidas, principalmente en el sector rural debido a su bajo costo de operación y simplicidad en el manejo tecnológico, respecto a los sistemas de tratamiento convencionales, además de ser estéticamente agradables a la vista.

Andrade (2008) indica que los humedales construidos se clasifican tradicionalmente en dos tipologías: (1) humedales de flujo superficial, donde el agua circula preferentemente a través de los tallos de las plantas y está expuesta directamente a la atmósfera, y (2) los humedales de flujo subsuperficial que se caracterizan porque la circulación del agua se realiza a través de un medio granular (subterráneo) con una profundidad de agua cercana a los 0.6m y en contacto con los rizomas y raíces de las plantas. De acuerdo con Delgadillo *et al.* (2008), estos últimos se dividen en (a) horizontales y (b) verticales, en función a la forma de entrada del agua al sistema. En la Tabla 3 se presenta la comparación entre humedales artificiales de acuerdo con el sistema de flujo.

Consideraciones finales

Las cuencas hidrográficas muestran un gran potencial para entender y organizar la relación entre la sociedad y la naturaleza en espacios geográficos específicos. Sin embargo, la cuenca no solamente se trata de un espacio, sino de un territorio o unidad de manejo que permite atender las problemáticas existentes a menor escala, haciendo partícipes tanto a los sistemas sociales como naturales que funcionan dentro de la misma.

Razón por la cual, se propone realizar la intervención en torno a las problemáticas de generación y descarga de las aguas residuales en unidades de

menor tamaño, como son las unidades de escurrimiento, en donde se establezcan acuerdos locales conjuntos sobre la recolección, tratamiento y disposición final de las aguas residuales, además de la integración de los distintos actores.

Tabla 3. Comparación entre humedales artificiales de acuerdo con el sistema de flujo.

	FLUJO SUPERFICIAL	FLUJO SUBSUPERFICIAL
Tratamiento	Tratamiento de flujos secundarios (aguas ya tratadas por otros medios, ej. Lagunas, biodiscos, fangos activados, etcétera).	Para tratar flujos primarios (aguas pretratadas ej. Tanques IMHOFF, pozos sépticos).
Operación	Opera con baja carga orgánica.	Altas tasas de carga orgánica.
Olor	Puede ser controlado.	No existe.
Insectos	Control es caro.	No existe.
Protección térmica	Mala, las bajas temperaturas afectan al proceso de remoción.	Buena, por acumulación de restos vegetales y el flujo subterráneo del agua mantiene una temperatura casi constante.
Área	Requieren superficies de mayor tamaño.	Requieren superficies de menor tamaño.
Costo	Menor costo en relación al subsuperficial.	Mayor costo debido al material granular que puede llegar a incrementar el precio hasta un 30%.
Valor ecosistema	Mayor valor como ecosistemas para la vida salvaje, el agua es accesible a la fauna.	Menor valor como ecosistema para la vida salvaje, el agua es difícilmente accesible a la fauna.
Usos generales	Son de restauración y creación de nuevos ecosistemas.	Tratamiento de aguas residuales, principalmente para casas aisladas y núcleos menores de 200 habitantes.
Operación	Son tratamientos adicionales a los sistemas convencionales (usadas para el tratamiento terciario y mejoramiento de calidad de agua).	Puede usarse como tratamiento secundario.

Fuente: Delgadillo *et al.*, (2010).

CAPÍTULO 2. SANEAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

La importancia del saneamiento de las aguas residuales radica en el reúso, reincorporación a los cuerpos de agua superficiales o infiltración a los mantos freáticos (Lahera, 2010). Sin embargo, el tema de calidad del agua siempre ha sido un aspecto considerado en segundo término después de la cantidad; atendiendo en parte a la demanda social de contar primero con el recurso (Jiménez, 2007).

En los países desarrollados es muy poco el caudal que se trata antes de regresarlo a los ríos, y mucho menor el que recibe tratamiento adecuado para su reúso (Lahera, 2010). Recientemente se han hecho esfuerzos por incrementar la cobertura de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales; sobre todo en las comunidades urbanas.

En México, existen diversas tecnologías para el tratamiento de aguas residuales domésticas o municipales, las cuales van desde las altamente mecanizadas y costosas, que demandan un gran consumo energético, hasta las tecnologías relativamente simples, ecológicas y de bajo costo (Zurita *et al.*, 2011). No obstante, las autoridades municipales usualmente no cuentan con el presupuesto necesario para ello, no conocen el abanico de alternativas para hacerlo, o simplemente no les interesa ya que no es una actividad que proporcione brillo político (Lahera, 2010).

2.1 Saneamiento de aguas residuales en México

De acuerdo con las estadísticas del agua en México, se ha presentado un incremento en la cobertura de agua potable y alcantarillado para los hogares, sobre todo urbanos, sin embargo, el tratamiento de las aguas usadas por la población no ha aumentado en la misma proporción (Lahera, 2010). Al respecto, se estima una cobertura de drenaje de 94.6 % en el estado de Querétaro (CONAGUA, 2017), sin embargo, es importante mencionar que la cobertura de drenaje utilizada por INEGI incluye formas de desalojo como fosas sépticas y tuberías que van a dar a

barrancas o río; sistemas que pueden ser cuestionables por sus implicaciones negativas sanitaria y ambientales (INMUJERES, 2011).

El inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales reporta que en nuestro país existen 2,536 plantas de tratamiento en operación, con una capacidad instalada de 180.6 metros cúbicos por segundo (CONAGUA, 2016). Sin embargo, la construcción de plantas depuradoras no es suficiente para controlar todos los problemas de contaminación del agua y no implica su correcto funcionamiento (Jiménez, 2007); además, muchas de ellas no se encuentran en operación o su capacidad de tratamiento ha sido rebasada.

La CONAGUA provee información acerca del “caudal tratado”, pero no así de la cantidad de aguas residuales generadas (Bunge, 2010). Al respecto Zurita *et al.* (2011) establece que el gasto promedio de agua de una persona al día es de 250 litros, de los cuales 80% se transforma en agua residual, esto significa que los habitantes están generando $34.3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ de agua residual doméstica. Sin embargo, para el área rural no se cuenta con información precisa sobre cuál es el volumen de agua residual generada y cuánta de ésta se somete a algún tipo de tratamiento (Marín, 2013; Menchaca *et al.*, 2017).

A nivel nacional apenas el 30% de aguas residuales generadas son tratadas; y solo una quinta parte de las cuencas trata más del 50% de las aguas residuales que genera, y la mayoría de ellas, tratadas o no, se descargan en cuerpos de agua naturales que posteriormente consume la población más pobre (Bunge, 2010). Como es el caso de la cuenca Lerma-Chapala-Santiago, la SEDESU reporta que en el 2002 la cuenca presentaba un volumen total de aguas residuales de 59.2 mm^3 , de los cuales 47.9 mm^3 provienen de agua residual municipal, y 11.2 mm^3 de agua residual industrial. De estos totales, anualmente se tratan 18.9 mm^3 , dejando 40.2 mm^3 sin tratar; es decir, sólo se trata el 32% de las aguas residuales en esta región (CONCYTEQ, 2003).

El vertido de aguas residuales no tratadas o parcialmente tratadas provoca la contaminación de las aguas superficiales, el suelo y las aguas subterráneas, esto se traduce a efectos adversos para la salud humana por la reducción de la calidad del agua y a efectos ambientales negativos debido a la degradación de las masas de agua y de los ecosistemas (WWDR, 2017).

Al respecto, Rodríguez y Silva (2015) realizaron una investigación para determinar la calidad del agua de la microcuenca de la Quebrada Estero en San Ramón, Costa Rica, los resultados de la investigación indican que la descarga de aguas residuales domésticas sin tratar es la principal causa del deterioro de la calidad del agua en la microcuenca de estudio, recomendando dar tratamiento a las aguas residuales para controlar la contaminación de cuerpos de agua.

Por otro lado, el reúso del agua es una actividad común, sobre todo en zonas con mayor actividad económica; generalmente se emplea el agua sin un tratamiento previo. Por esta razón, es importante ligar la reutilización a los programas de saneamiento pero en los informes emitidos por la CONAGUA entre 1989 y 2005, el Subsector de Agua y Alcantarillado únicamente considera la depuración de aguas como estrategia de saneamiento y no de reúso (Jiménez, 2007). Para lograr lo anterior existen diversas alternativas de tipo convencional (uso de energía y personal técnico) y no convencional (sin uso energético).

2.2 Técnicas de tratamiento de aguas residuales en México

Para incrementar la cobertura de saneamiento de aguas residuales la CONAGUA utiliza diferentes procesos para remover los contaminantes. Los métodos de tratamiento pueden ser físicos, químicos y biológicos. El agua residual al ser tratada con uno de los procesos antes mencionados se le puede someter a procesos adicionales denominados tratamientos secundarios, que mejoran la calidad del efluente, proporcionándole un valor agregado para actividades específicas de reúso e intercambio (CONAGUA, 2016). Existe una gran diversidad de variantes para

depurar las aguas residuales, en la Tabla 4 se describen los sistemas de depuración más usados en el tratamiento de aguas residuales municipales en México.

Tabla 4. Procesos de tratamiento de aguas residuales municipales.

PROCESOS	CAUDAL TRATADO (l/s)	PORCENTAJE %	NÚMERO DE PLANTAS
Aerobio	74.9	0.06	10
Anaerobio	637.8	0.52	93
Biológico	836	0.68	29
Discos biológicos o biodiscos	923.7	0.75	24
Dual	13,574.6	10.98	23
Filtros biológicos o rociadores o percoladores	5,338.3	4.32	44
Fosa séptica	140.3	0.11	114
Fosa séptica + filtro biológico	30	0.02	30
Fosa séptica + Wetland	185	0.15	114
Humedales (Wetland)	1,209.9	0.98	72
Lagunas aireadas	7,391.3	5.98	34
Lagunas de estabilización	14,292.2	11.56	776
Lodos activados	6,914.8	55.95	732
Primario avanzado	4,415.4	3.57	11
Primario o sedimentación	1,570.3	1.27	21
Rafa + filtro biológico	418.1	0.34	56
Rafa o Wash	1,357.1	1.1	143
Rafa, Wash + humedal	274.2	0.22	31
Reactor enzimático	101.4	0.08	49
Sedimentación + Wetland	36.6	0.03	21
Tanque Imhoff	356.9	0.29	52
Tanque Imhoff + filtro biológico	130.2	0.11	21
Tanque Imhoff + Wetland	9	0.01	3
Terciario	50.3	0.04	4
Zanjas de oxidación	989.6	0.8	15
Otro	95.8	0.08	14
Total nacional	123,586.8	100	2536

Fuente: Elaborado con información de CONAGUA (2016).

En el contexto urbano de México, los métodos de tratamiento más común se llevan a cabo en lagunas de estabilización, seguido por las plantas de lodos activados (CONAGUA, 2016). Sin embargo, en términos del caudal tratado, un poco más del 40% se procesa con lodos activados mientras que el 18% se trata en lagunas de estabilización (Bunge, 2010). No obstante, estos sistemas requieren alto

costo de inversión, terrenos grandes, experiencia en el diseño y construcción, y el lodo requiere adecuada remoción y tratamiento (Tilley, 2011).

Las lagunas de estabilización suponen costos con valores que van de los 7,000-8,000 USD/ (l/s) para un caudal elevado (900 l/s); mientras que en plantas menores el costo aumenta, en torno a los 13,000 USD/ (l/s) para un caudal de 100 (l/s). Para el proceso de lodos activados los costos de inversión se estiman entre 18,000-36,000 USD/ (l/s), en función del gasto de diseño de la planta (Escalas, 2006; Haro y Aponte, 2010).

En zonas rurales principalmente se instalan fosas sépticas como único tratamiento de depuración de aguas residuales. Se trata de una tecnología no convencional, pese a que constituyen una buena alternativa para el tratamiento *in situ*, presenta poca reducción de patógenos, sólidos y orgánicos, incumpliendo con lo establecido por la normativa mexicana (Tilley, 2011).

De manera general, las aguas residuales deben ser tratadas en zonas urbanas y rurales, considerando que en ambos casos aumenta la generación de aguas servidas provocando la contaminación de cuerpos de agua y/o suelo donde son descargadas. Sin embargo, para zonas rurales es recomendable el uso de tecnologías no convencionales, los humedales artificiales representan una buena opción para dar un tratamiento secundario a estas aguas, con una alta reducción de DBO, sólidos y patógenos (Tilley, 2011).

2.3 Los humedales artificiales como sistemas de tratamiento

Comparados con los sistemas convencionales de tratamiento, los humedales construidos tienen varias ventajas, ya que son de menor costo de construcción y mantenimiento. Este tipo de sistemas han sido ampliamente utilizados en países desarrollados para el tratamiento de diversas fuentes puntuales de contaminación, sin embargo, en México sólo existen 137 humedales construidos que tratan aguas

residuales domésticas (García-García *et al.*, 2016; Hernández, 2016). Razón por la cual es importante revalorizar el uso de estos sistemas.

2.3.1 Experiencias internacionales

Se han realizado varios estudios a nivel internacional acerca de la implementación de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales, tal es el caso de la investigación de Mena (2014), quien implementó un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal en Colombia, según los datos obtenidos el agua residual tratada presentó una calidad óptima para realizar una descarga a un cuerpo receptor, e incluso puede ser utilizada para uso agrícola porque los valores de remoción fueron mayores al 80%, quedando por debajo de los valores estipulados por la normativa colombiana. Por su baja complejidad de construcción es una de las alternativas más eficientes y de bajo costo, por tanto se recomienda su implementación tanto en urbanizaciones como en comunidades.

Por su parte, Granados (2018) realizó una investigación sobre los problemas de saneamiento básico de las aguas residuales en las comunidades rurales del municipio de Aquitania, Colombia. Concluyó que los humedales artificiales se convierten en una alternativa de solución sostenible y de acceso económico fácil. En este estudio se efectuó la selección de las plantas fitorremediadoras que pueden utilizarse en zonas rurales: Papiro Enano, Lirio Amarillo, Lirio Blanco, Lirio Morado y Lirio de Páramo. Se realizó un sistema piloto en la zona obteniendo eficiencias de remoción de 53.1% DBO, 36.6% DQO y 75.7% SST. Finalmente se llevó a cabo una evaluación socioeconómica y ambiental obteniéndose que la aplicación de un proyecto a escala mediana de humedales artificiales es factible.

2.3.2 Experiencias nacionales

En México, aunque en menor proporción y a escala piloto, también existen estudios acerca de la eficiencia de los humedales artificiales para la remoción de contaminantes en aguas residuales, tal es el caso de la investigación realizada por Acosta *et al.* (2016), en donde se realizó el diseño y operación de doce humedales

artificiales de flujo superficial (HAFS) bajo tres tratamientos: HAFS-Tule, HAFS-Carrizo y HAFS-Grava. Los HAFS-Tule presentaron mayor eficiencia en remoción de contaminantes (95%), cumpliendo con la NOM-001-SEMARNAT-1996; seguidos por los HAFS-Carrizo (89%) y por último los HAFS-Grava (70%). En términos de mantenimiento y operación, los humedales artificiales demostraron ser una alternativa económicamente viable y amigable al ambiente para el tratamiento de aguas residuales domésticas.

La eficiencia de la remoción de los contaminantes también depende del tipo de humedal construido. Al respecto, Quintero (2014) realizó la evaluación de cuatro humedales piloto, dos de flujo subsuperficial y dos de tipo superficial. El ensayo se desarrolló en las instalaciones del Centro de Investigación Santa Lucía, del Instituto Universitario de la Paz; es un estudio experimental, para dos tipos de tratamiento, cada uno con su tratamiento testigo. La investigación contempló tres fases; recopilación de información primaria y secundaria, incluyendo la caracterización inicial de las aguas a tratar; determinación de las especificaciones técnicas del modelo implementado; y la evaluación físico, química y biológica de las aguas residuales tratadas. Los parámetros evaluados fueron: sólidos totales suspendidos, sólidos sedimentables, grasas y aceites, conductividad, pH, temperatura y DBO₅. Se concluyó que el sistema más efectivo para la remoción de contaminantes es el humedal de tipo subsuperficial.

Es importante destacar que la implementación del sistema de tratamiento por sí sola no es capaz de resolver problemáticas sociales y ambientales. Por ello, la participación y apropiación de la población es fundamental para el éxito de las tecnologías implementadas en el saneamiento de aguas residuales. En este sentido, Hernández (2016) realizó una revisión bibliográfica sobre la producción de flores en humedales construidos para el tratamiento de aguas residuales. Se encontró que una estrategia utiliza plantas acuáticas nativas de humedales, llamadas hidrófitas, que producen flores grandes y llamativas. La segunda estrategia utiliza plantas terrestres ornamentales de interés comercial, que toleran

la inundación. Se documenta un caso de éxito de aplicación de la segunda estrategia con participación comunitaria de cinco mujeres para el mantenimiento de un humedal construido desde el 2013 con producción de alcatraces, anturios y azucenas en Pinoltepec, Veracruz. Se concluye que la estrategia de utilizar plantas terrestres ornamentales de interés comercial en humedales construidos para el tratamiento de aguas residuales es una opción factible en áreas rurales de México, ya que se asegura el mantenimiento del sistema a través de la participación comunitaria que obtiene beneficios al comercializar las flores producidas.

Consideraciones finales

Con lo expuesto en este apartado es evidente la falta de saneamiento de aguas residuales a nivel nacional, sin embargo, también fue posible describir diversas estrategias usadas actualmente para contrarrestar los efectos ocasionados por las descargas de aguas residuales, destacando los humedales artificiales como una alternativa económicamente viable tanto en urbanizaciones como en comunidades rurales.

En este sentido, la instalación de un humedal subsuperficial de flujo horizontal representa la mejor opción, debido a que el sistema logra una significativa eliminación de patógenos. Dado que el agua fluye por debajo de la superficie, se minimiza cualquier contacto de organismos patógenos con la vida silvestre y humana. También se reduce el riesgo de criaderos de mosquito, ya que no hay agua estancada, como sucede en el humedal artificial de flujo superficial. Además de ser de fácil mantenimiento y estéticamente agradable.

CAPÍTULO 3. MICROCUENCA BUENAVISTA

La microcuenca Buenavista se ubica geográficamente en el Estado de Querétaro, al norte del Municipio de Querétaro; en la parte norte colinda con el estado de Guanajuato, al sur con la microcuenca Santa Rosa Jáuregui, al este con las localidades Jofre, La Estacada, Pinto y Pintillo, y al oeste con las localidades Charape de la Joya, Guanajuato y La Joya, Querétaro (Figura 1).

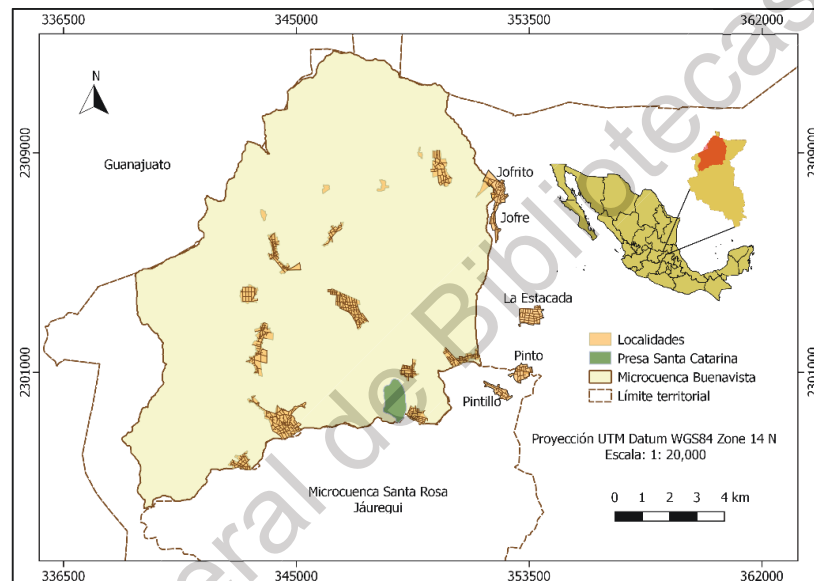


Figura 1. Localización de la microcuenca Buenavista. Fuente: Elaboración a partir de datos del INEGI (2017).

Está conformada por dieciocho localidades: Buenavista, Pie de Gallo, Puerto de Aguirre, Jofrito, La Luz, San Isidro Buenavista, La Barreta, La Monja, Cerro de la Cruz, Corea, Estancia de la Rochera, La Carbonera, Loma del Chino, Presa de Becerra, Cañada de la Monja, La Canteras, La Estancia de Palo Dulce y Lomas del Mirador; con una población de 22,860 habitantes.

Para efecto de esta investigación la comunidad más relevante es La Carbonera, se trata de una comunidad en la periferia urbana de la ciudad de Querétaro. Se encuentra en la zona media de la microcuenca Buenavista (Figura 2) y en la unidad de escurrimiento a estudiar, está situada a 11 km Noroeste de Santa

Rosa Jáuregui, delegación a la que pertenece. Cuenta con una población de 522 habitantes distribuidos en 111 viviendas.

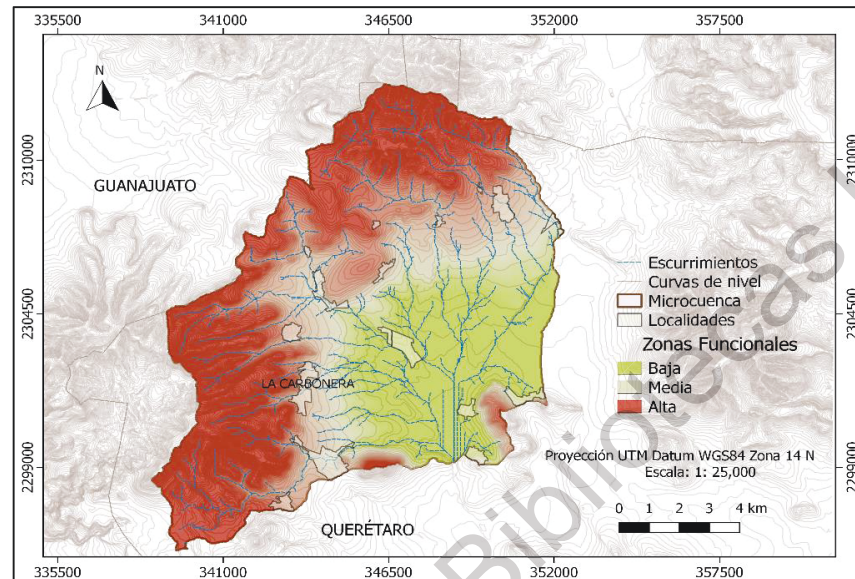


Figura 2. Zonas funcionales de la microcuenca Buenavista, que muestra la ubicación de la localidad La Carbonera. Fuente: Elaboración a partir de la Red Hidrográfica Nacional, INEGI (2017).

3.1 Uso de suelo y vegetación

Es importante conocer la dinámica del uso de suelo debido a la influencia en procesos naturales como recarga de acuíferos, escurrimiento superficial y pérdida de suelo (Trucíos *et al.*, 2011). En este sentido, en la mayor parte de la superficie de la microcuenca (5,954.85 hectáreas) se desarrolla la agricultura, principalmente de temporal (40%) y únicamente 2.69% es agricultura de riego. El 41.25% de la superficie está ocupada por vegetación secundaria. El resto del territorio es ocupado por vegetación primaria, zona urbana y cuerpos de agua. En la Figura 3 se presenta el uso de suelo y vegetación de la microcuenca Buenavista.

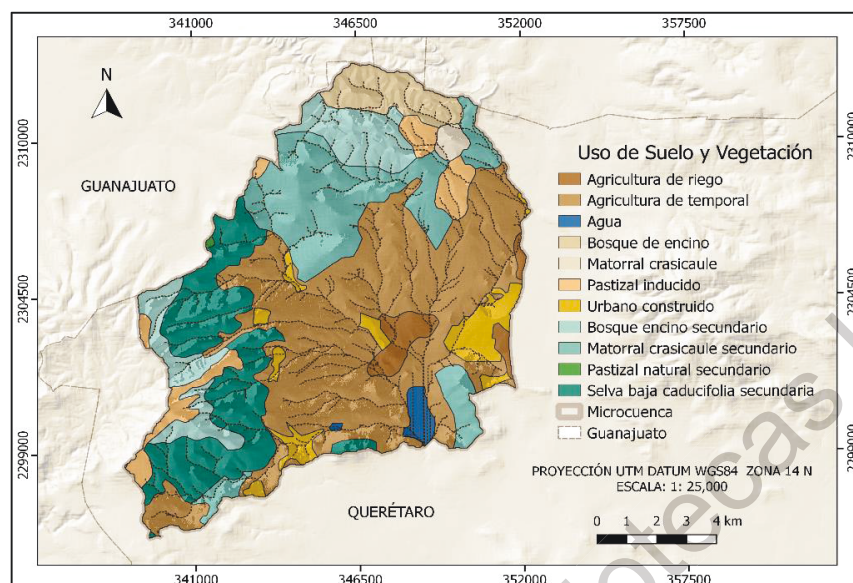


Figura 3. Uso de suelo y vegetación de la microcuenca Buenavista. Fuente: Elaboración a partir de la Carta de Uso de Suelo y Vegetación Serie VI, INEGI (2017)

3.1.1 Aspectos Socioeconómicos

El uso de suelo en la microcuenca Buenavista depende de las características del suelo y de la vegetación que los cubre; factores importantes para el tipo de actividades socioeconómicas desarrolladas dentro del territorio. De modo que, la agricultura es una de las principales actividades económicas en las localidades de esta microcuenca.

El maíz para grano es el principal cultivo. La variedad que siembran es maíz criollo de la región, tanto en la parte baja, media y alta; en esta última también se localiza una pequeña parte de riego. Aunque la producción no presenta ingresos económicos importantes en la actualidad, si tiene importancia para el autoconsumo y para la alimentación de ganado.

La siembra de frijol es otra actividad agrícola de importancia que se desarrolla en las tres zonas funcionales. Este cultivo se siembra asociado con el maíz o solo; la variedad que se siembra es Flor de Mayo Criollo. El destino de la producción es

de autoconsumo. En la parte baja de la microcuenca se encuentran cultivos de alfalfa, el cual es utilizado para la alimentación del ganado.

El uso de suelo en la microcuenca Buenavista determina el aprovechamiento y comportamiento del agua residual. Al ser la agricultura la principal actividad económica y la que ocupa mayor superficie dentro de este territorio, con un tratamiento adecuado, el agua residual tiene un gran potencial para ser utilizada en el riego agrícola.

3.2 Edafología

Según Velázquez *et al.* (2002) existe una relación entre los tipos de suelo y el riesgo de salinidad por el riego de aguas residuales. En la microcuenca se presentan cinco tipos de suelo (Figura 4), siendo el Litosol y el Vertisol Pélico los más abundantes. El Litosol se caracteriza por ser suelos muy fértiles y su susceptibilidad a la erosión. Por su parte, los suelos Vertisol presentan una estructura masiva y un alto contenido de arcilla, tienen baja susceptibilidad a la erosión y alto riesgo de salinización. En este contexto, existe la posibilidad de acumulación de sales por la descarga de aguas residuales, alterando la estructura y función de este recurso.

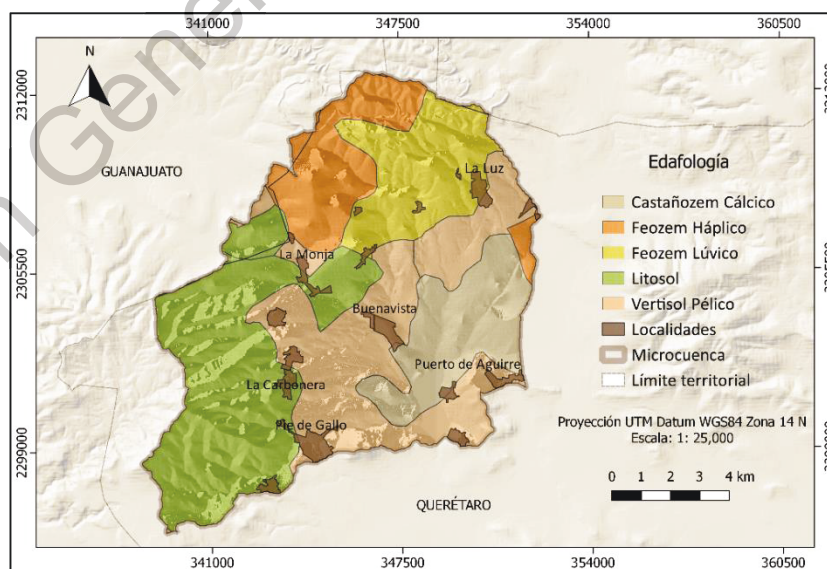


Figura 4. Mapa de edafología de la microcuenca Buenavista. Fuente: Elaboración a partir de la Carta Edafológica Serie II, INEGI (2013).

3.3 Hidrología

La microcuenca Buenavista forma parte de la Red Hidrológica Lerma Santiago (RH12), pertenece a la cuenca hidrográfica del Río Laja (H) y a la subcuenca Río Apaseo (d). Está formada por corrientes superficiales intermitentes y efímeras, originados por los escurrimientos en época de lluvias, todas estas corrientes alimentan a la presa Santa Catarina.

Los datos hidrológicos de la microcuenca dan una apreciación del comportamiento de las aguas residuales dentro del territorio. Generalmente las descargas de aguas residuales coinciden con la red de drenaje de las cuencas. En este sentido, la zona de estudio se trata de una microcuenca con tendencia a circunferencia, es de tipo exorreica con drenaje dendrítico, y presenta un cauce con alineamiento casi recto, esta situación acelera cualquier tipo de escurrimiento, desde las partes más altas hasta el punto de salida, alterando la química de los cauces, principalmente de la presa Santa Catarina en donde se producen peces para venta y autoconsumo.

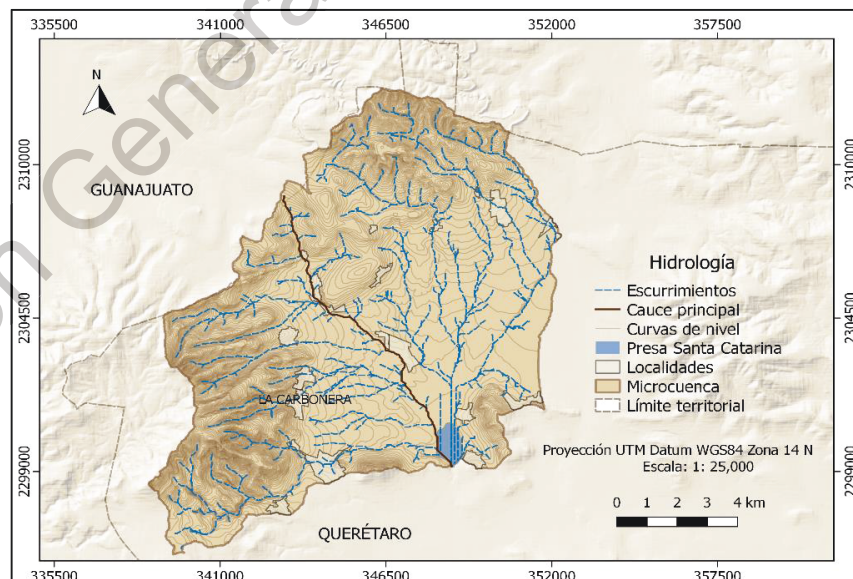


Figura 5. Mapa de escurrimiento de la microcuenca Buenavista. Fuente: Elaboración a partir de la Red Hidrográfica Nacional, INEGI (2017).

Consideraciones finales

Las características de la microcuenca Buenavista proporcionan elementos de la situación actual, pudiendo entender el comportamiento de las aguas residuales que transitan por ella, además del impacto sobre la estructura y funcionamiento de la microcuenca que la falta de manejo de aguas residuales puede ocasionar. Por lo tanto, para atender dicha problemática se subdivide a la microcuenca Buenavista en unidades de escurrimientos, a partir de las curvas de nivel y cauces, y en zonas funcionales: alta, media y baja, con base en la elevación relativa de sus partes.

Las cualidades físicas, ambientales, sociales y económicas de la zona de estudio inciden en la toma de decisiones para el tratamiento de las aguas residuales. En este sentido, el tipo de suelo y los escurrimientos posibilitan la implementación de un sistema de depuración basado en humedales como una solución adecuada, por la capacidad de carga y por no ser una zona susceptible a inundaciones.

CAPÍTULO 4. MÉTODOS Y HERRAMIENTAS

El presente capítulo describe los materiales y métodos desarrollados para alcanzar los objetivos planteados en esta investigación. El interés se centra en el manejo, tratamiento y disposición final de las aguas residuales de la microcuenca Buenavista, para diseñar un humedal artificial subsuperficial de flujo horizontal en la comunidad La Carbonera que se encuentra dentro de una unidad de escurrimiento de la microcuenca y tratar de resolver las afectaciones socio-ambientales por el vertimiento de aguas residuales sin tratamiento.

4.1 Proceso metodológico

El proceso metodológico (Figura 6) consta de cuatro etapas. Primeramente se identificaron todos los puntos donde se realiza la disposición final de las aguas residuales domésticas de la microcuenca Buenavista; para luego caracterizar el agua residual. Para tener una idea general de las afectaciones por la descarga de aguas residuales sobre el suelo, se procedió con la caracterización de este recurso, estas dos últimas etapas se realizaron a nivel de unidad de escurrimiento. A partir de la identificación de los contaminantes presentes y de las afectaciones de las descargas de aguas residuales se realizó, en una cuarta etapa, el diseño de un humedal artificial como una alternativa eco-tecnológica para la mitigación de la problemática encontrada.

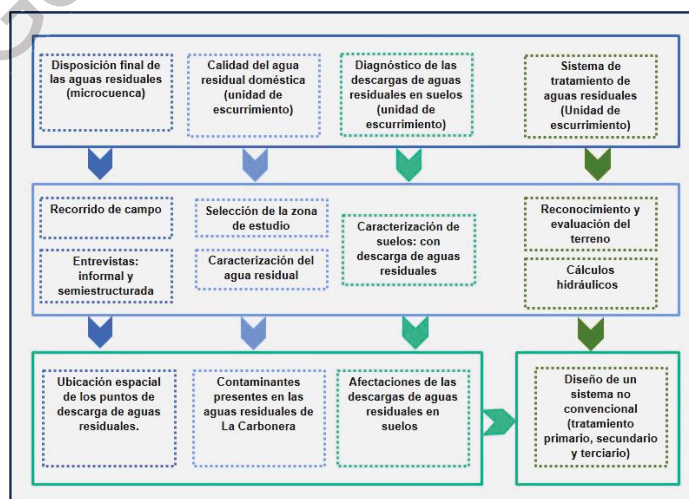


Figura 6. Descripción del proceso metodológico. Fuente: Elaboración propia.

4.1.1 Disposición final de las aguas residuales domiciliarias de la microcuenca Buenavista

Para conocer la disposición final del agua residual y el estado actual del alcantarillado en la microcuenca Buenavista, se realizaron recorridos de campo a las dieciocho comunidades que comprenden la zona de estudio. A partir de los recorridos exploratorios previos y considerando la información que se pretendía recopilar, se ubicaron espacialmente todas las descargas de aguas residuales dentro de la microcuenca de estudio.

Se aplicaron entrevistas (Figura 7) para conocer el uso, tratamiento y disposición final del agua residual doméstica desde la perspectiva de los habitantes de la microcuenca, y explorar la forma de resolución de conflictos que puede haber por el mal manejo del agua residual. La estructura de la entrevista realizada se apoyó en los siguientes puntos: 1) Descarga final del agua residual, 2) Manejo público del agua residual, 3) Sistemas de tratamiento público y a nivel habitacional, 4) Reutilización de agua residual e 5) Interés para implementar un sistema accesible de tratamiento de agua residual.



Figura 7. Aplicación de entrevista a informantes claves. Foto de Julio Sánchez (2018).

Las entrevistas aplicadas fueron de dos tipos: informal y semiestructurada (Vázquez, 2010). La entrevista informal fue la primera que se aplicó al encargado del Departamento de Operaciones de la delegación de Santa Rosa Jáuregui, sirviendo como base para recabar la información de las personas a las que se podían aplicar las entrevistas semiestructuradas.

Las entrevistas semiestructuradas (Anexo 1) se dirigieron a informantes claves, se trata de personas que tienen información directamente relevante con los objetivos de la entrevista (Valles, 1998; Vázquez, 2010). Para efectos de la investigación se realizaron 18 entrevistas, las cuales se aplicaron a habitantes de la microcuenca que tienen cargos como delegados o subdelegados, con un rango de edad de 30 a 60 años.

Por último, se obtuvo la información sobre aspectos demográficos y cobertura de servicios de drenaje del Censo de Población y Vivienda 2010 del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2010), con la finalidad de hacer la comparación con los datos encontrados en esta investigación.

4.1.2 Conocer la calidad del agua residual doméstica

Para tener una idea general de la carga de contaminantes presentes en el agua residual doméstica de la microcuenca Buenavista, se caracterizó el efluente de la comunidad La Carbonera que se encuentra en la unidad de escurrimiento a estudiar.

Se colectó una muestra en época de lluvia y una muestra en época de estiaje para conocer la fluctuación de los contaminantes, y poder realizar el diseño de los parámetros operativos apropiados para tratar la carga contaminante del afluente. Las muestras fueron colectadas directamente del sistema de cámaras sépticas de La Carbonera, identificado previamente en los recorridos de campo sobre la zona, se realizó de acuerdo a la Norma Mexicana NMX-AA-3-1980.

La selección de los parámetros se realizó de acuerdo al origen y destino final del agua residual (Delgadillo *et al.*, 2010). Los parámetros que se evaluaron fueron: temperatura, arsénico, zinc, cobre, níquel, cadmio, mercurio, dureza, conductividad eléctrica, pH, nitrógeno total, fósforo total, carbono orgánico, sólidos sedimentables, Demanda Química de Oxígeno (DQO), Demanda Biológica de Oxígeno (DBO₅), coliformes fecales, grasas y aceites. Las muestras fueron analizadas *in situ* y en el Laboratorio de Calidad de Agua y Suelos de la Universidad Autónoma de Querétaro (Figura 8).

Los resultados obtenidos del efluente de la cámara séptica de la comunidad La Carbonera fueron cotejados con los estándares establecidos en la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996, donde se especifica los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.



Figura 8. Toma de muestra y análisis *in situ* de las aguas residuales. Fotos de Julio Sánchez (2018).

4.1.3 Diagnosticar la descarga de aguas residuales en suelos de una unidad de escurrimiento

Durante los recorridos de campo se identificaron los focos importantes de contaminación por el vertido de aguas residuales en toda la microcuenca. Para verificar la contaminación en suelo por aguas residuales se realizó el diagnóstico de este recurso en La Carbonera.

La colecta de las muestras se llevó a cabo en un campo de cultivo donde se descargan aguas residuales (Figura 9). Sin embargo, para demostrar las afectaciones del vertido de aguas residuales en el suelo fue necesario una muestra testigo, para ello se caracterizó suelo sin descarga de aguas residuales. La selección de las parcelas se hizo a través de los datos obtenidos en las entrevistas.



Figura 9. Toma de muestra de suelo. Foto de Paola Martínez (2018).

Por tratarse de suelos homogéneos, en ambos tipos de suelos se colectó una muestra simple tanto en época de lluvia como de estiaje, con base a la Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000. Los parámetros que se evaluaron fueron: pH, conductividad eléctrica, materia orgánica y textura. Las muestras se analizaron

en el Laboratorio de Calidad de Agua y Suelos de la Universidad Autónoma de Querétaro.

4.1.4 Diseñar el sistema de tratamiento no convencional

Antes de comenzar con el diseño del sistema de tratamiento fue necesario realizar el reconocimiento y evaluación del terreno. Aspectos como la pendiente, disponibilidad del terreno, acceso y uso del suelo fueron fundamentales para adecuar el diseño a las condiciones reales del lugar en el cual se proyectará la obra.

En el diseño del sistema se tuvo en cuenta la utilización de materiales presentes y accesibles en la zona, mientras que para los resultados esperados de eficiencia en remoción de contaminantes se contempló la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996 y NOM-003-SEMARNAT-1997. En la Tabla 5 se muestra la fórmula básica para calcular el caudal del sistema de tratamiento.

Tabla 5. Ecuación básica para calcular el caudal del sistema de tratamiento.

CAUDAL DE DISEÑO	
Modelo matemático:	Componentes del modelo:
$Qar = (0.8 * población * dotación) / (1000)$	Qar= Caudal agua residual Población= Núm. de personas a atender Dotación= Caudal diario por persona

Fuente: Elaborado con información de Mena (2014).

Para que el sistema de depuración tenga una mayor remoción de contaminantes, se planteó un reactor anaerobio con deflectores para dar un tratamiento primario; como tratamiento secundario se consideró un humedal artificial subsuperficial de flujo horizontal; y finalmente como tratamiento terciario se propuso una laguna de maduración aeróbica. Para efectuar los cálculos hidráulicos del tratamiento primario se usó el modelo matemático recomendado por Mena (2014) (Tabla 6).

Tabla 6. Modelos matemáticos para el diseño del reactor anaerobio con deflectores.

VOLUMEN ÚTIL REACTOR ANAEROBIO CON DEFLECTORES	
Modelo matemático:	Componentes del modelo:
$V_u = 100 + N_c(CT + KLF)$	V_u = Volumen útil N_c = Número de contribuyentes C = Dotación de agua residual por contribuyente T = Periodo de retención por tasa de contribución diaria K = Tasa de acumulación de lodo digerido en días. F = Factor

Fuente: Elaborado con información de Mena (2014).

En el diseño del humedal artificial subsuperficial de flujo horizontal (tratamiento secundario), Delgadillo *et al.* (2010) recomienda que antes del inicio del diseño se realicen pruebas de conductividad y porosidad del sustrato, esto para definir exactamente el tipo de material a emplearse. Asimismo, se recomienda multiplicar el valor de la conductividad por 1/3 o bien por 0.1 (10%) para evitar problemas de atascamiento por acumulación de lodos y raíces. En la Tabla 7 se presentan las características principales de los sustratos usados en los humedales.

Tabla 7. Materiales empleados en el diseño y construcción de humedales horizontales.

TIPO DE MATERIAL	TAMAÑO EFECTIVO D10 (MM)	CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA, KS (M ³ /M ² /D)	POROSIDAD, N %
Arena gruesa	2	100-1,000	28-32
Arena gravosa	8	500-5,000	30-35
Grava fina	16	1,000-10,000	35-38
Grava media	32	10,000-50,000	36-40
Roca gruesa	128	50,000-25,0000	38-45

Fuente: Delgadillo *et al.* (2010).

Una vez establecidos los materiales que se emplearán como sustrato, se procede con el cálculo del área superficial requerida para el humedal artificial y el tiempo de retención del agua residual en el sistema, para ello se emplearon los modelos matemáticos recomendados por Delgadillo *et al.* (2010) y Mena (2014). En la Tabla 8 se muestran las ecuaciones básicas empleadas.

Para calcular el largo y ancho del humedal se considera la ley de Darcy para flujo en medio poroso. En la Tabla 9 se presentan las ecuaciones empleadas.

Finalmente, para el diseño de la laguna de maduración aeróbica como tratamiento terciario se tomaron los cálculos hidráulicos recomendados por Cortés *et al.* (2011). En la Tabla 10 se presentan las ecuaciones empleadas.

Tabla 8. Modelos matemáticos para el diseño del humedal artificial subsuperficial de flujo horizontal.

TEMPERATURA DE DISEÑO DEL HUMEDAL ARTIFICIAL	
Modelo matemático: $Kt = (1.104/\text{día}) (1.06)^{(T2-20)}$	Componentes del modelo: T2= temperatura del agua (°C)
ÁREA SUPERFICIE REQUERIDA DEL HUMEDAL ARTIFICIAL	
Modelo matemático: $As = Q (\ln Co - \ln Ce) / (Kt * n * h)$	Componentes del modelo: As= Área superficial del humedal (m ²). Q= Caudal promedio (m ³ /día). Co= Concentración de la DBO ₅ en el afluente (a la entrada del humedal, mg/l). Ce= Concentración de la DBO ₅ en el efluente (a la salida del humedal, mg/l). Kt= Conductividad hidráulica (1/día). n= porosidad del material que forma el sustrato (fracción decimal). h= profundidad del sustrato (m).
TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRAÚLICA DEL AGUA EN EL HUMEDAL	
Modelo matemático: $TRH = (AS * h * n) / Q$	Componentes del modelo: As= área superficial h= Profundidad del humedal n= Porosidad efectiva Q= Caudal

Fuente: Elaborado con información de Delgadillo *et al.* (2010) y Mena (2014).

Tabla 9. Cálculo relación Largo- Ancho del humedal artificial subsuperficial de flujo horizontal.

HUMEDAL RELACIÓN LARGO (L): ANCHO (W)	
Modelo matemático	Componentes del modelo
$Ac = Q / (ks * S)$	Ac= área vertical en m ² Q= caudal medio en m ³ /s Ks= conductividad hidráulica (m/s) S = pendiente (m/m)
$b = \sqrt{(As / 3)}$ $L = 3b$	As= área superficial del humedal (m ²) b= ancho del humedal (m)

Fuente: Delgadillo *et al.* (2010).

Tabla 10. Modelos matemáticos para el diseño de la laguna de maduración aeróbica.

VOLUMEN DE LA LAGUNA	
Modelo matemático: $V = (Q_i)(O)$	Componentes del modelo: Q_i = Caudal del influente (m ³ /día) O = Tiempo de retención hidráulico
ÁREA DE LA LAGUNA	
Modelo matemático: $A = V / Z$	Componentes del modelo: V = Volumen de la laguna (m ³) Z = Profundidad de la laguna (1.5 m)
RELACIÓN LARGO (L) : ANCHO (B)	
Modelo matemático: $B_{prom} = \sqrt{A/X}$	Componentes del modelo: B_{prom} = Ancho promedio de la laguna (m) A = Área de la laguna (m ²) $X=3$
$L_{prom} = A_{prom}/B_{prom}$	L_{prom} = Longitud promedio de la laguna (m) A_{prom} = Área de la laguna (m ²)
$B_{sup} = B_{prom} + (Z)(Tálud)$	B_{sup} = Ancho promedio de la laguna (m) B_{sup} = Ancho superior de la laguna (m) Z = Profundidad de la laguna (1.5 m) $Tálud = 2:1$
$L_{sup} = L_{prom} + (Z)(Tálud)$	L_{sup} = Largo superior de la laguna (m) Z = Profundidad de la laguna (1.5 m) $Tálud = 2:1$
CÁLCULO ÁREA SUPERFICIAL	
$A_{sup} = (B_{sup})(L_{sup})$	B_{sup} = Ancho superior de la laguna (m) L_{sup} = Largo superior de la laguna (m)

Fuente: Elaborado con información de Cortés *et al.* (2011).

CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos con la aplicación de la metodología propuesta en esta investigación. La información obtenida mostró las problemáticas generadas por el manejo y disposición final de las aguas residuales en todas las comunidades de la microcuenca Buenavista.

5.1 Disposición final de las aguas residuales domiciliarias de la microcuenca Buenavista

De acuerdo con los datos reportados por el INEGI (2010), el 86% de las 5263 viviendas asentadas dentro de la microcuenca disponen de drenaje (Tabla 11). Sin embargo, este estudio registró que algunas de las localidades incluidas en los datos del INEGI no cuentan con el servicio de red de drenaje público, como es el caso de Estancia de la Rochera, Presa de Becerra, Cañada de la Monja y La Cantera.

Tabla 11. Aspectos demográficos y cobertura de drenaje por localidades.

LOCALIDAD	POBLACIÓN TOTAL	VIVIENDAS HABITADAS	VIVIENDAS CON DRENAJE
Buenavista	4115	995	984
Pie de Gallo	4089	898	729
Puerto de Aguirre	2678	653	593
Jofrito	1729	395	369
La Luz	1659	361	266
San Isidro Buenavista	1584	357	346
La Barreta	1223	270	231
La Monja	1159	292	250
Cerro de la Cruz	1003	220	163
Corea	917	216	212
Estancia de la Rochera	683	157	125
La Carbonera	522	111	80
Loma del Chino	423	97	89
Presa de Becerra	418	98	52
Cañada de la Monja	203	44	39
La Cantera	197	41	11
La Estancia de Palo Dulce	147	34	12
Lomas del Mirador	111	24	0
Total	22860	5263	4551

Fuente: INEGI (2010).

La diferencia encontrada en la cobertura del sistema de alcantarillado en esta investigación y el reporte que hace el INEGI obedece a las formas de desalojo de aguas residuales que contempla, pues incluye también las fosas sépticas familiares, y tuberías que van a dar a barrancas o ríos (INMUJERES, 2011).

El sistema de alcantarillado únicamente contempla la conducción de aguas residuales y omite el saneamiento de las mismas, ante la falta de un sistema de saneamiento eficiente la disposición final de aguas servidas se hace en fosas sépticas, cuerpos de agua, vía pública y campos agrícolas (Figura 10).



Figura 10. Descarga de aguas residuales en calles de la microcuenca Buenavista. Fotos de Julio Sánchez (2018).

El encargado del Departamento de Operaciones de la Delegación Santa Rosa Jáuregui señaló que, la calidad del agua superficial y del suelo en la microcuenca Buenavista puede verse comprometida por descargas de aguas residuales, esto se debe a que la infraestructura de la red de alcantarillado no tiene la capacidad para cumplir con las necesidades básicas de recolección, tratamiento y evacuación. (J. Bárcenas, comunicación personal, 15 de noviembre de 2018). En la Figura 11 se presenta la ubicación espacial de la disposición final de aguas residuales dentro de la microcuenca Buenavista.

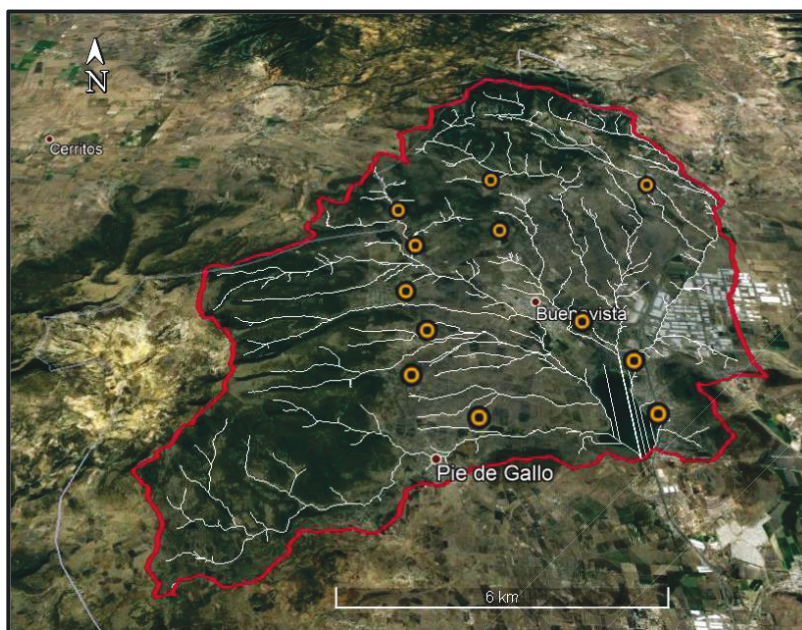


Figura 11. Ubicación espacial de la disposición final de aguas residuales domésticas. Fuente: Elaboración a partir de Google Earth (2018).

Las descargas de aguas residuales han ido aumentando en forma proporcional al crecimiento poblacional. La mayoría de las comunidades de la microcuenca Buenavista presentan un incremento en su población, lo que ocasiona que las nuevas viviendas se conecten a la red de drenaje existente y esto a su vez provoca que la capacidad de los sistemas de recolección instalados sea rebasada antes de la vida útil establecida.

Respecto a lo anterior, Domínguez (2010) menciona que el crecimiento poblacional, la mala planeación urbana y la falta de capacidad institucional son algunas causantes de la insuficiente capacidad de la red de drenaje, esto se debe a que generalmente las instalaciones de alcantarillado se hacen de acuerdo a las necesidades actuales de cada comunidad, omitiendo la ampliación del sistema.

La insuficiente cobertura del servicio de recolección y depuración de aguas residuales ha ocasionado que los habitantes de la microcuenca desarrollen otros mecanismos para solventar dichas necesidades. En este sentido, la población que no está conectada a la red de saneamiento depende principalmente de sistemas de

eliminación *in situ*, como las letrinas y fosas sépticas a nivel habitacional. En estos sistemas, las aguas grises se eliminan por escorrentía. En la Tabla 12 se muestran los métodos de evacuación utilizados en localidades de la microcuenca.

Tabla 12. Descarga y uso de aguas residuales en las localidades de la microcuenca Buenavista.

LOCALIDAD	DESCARGA Y USO DEL AGUA RESIDUAL
Buenavista	Conducción de aguas residuales mediante la red de alcantarillado y la descarga se hace directamente en terrenos de cultivos de maíz. Uso directo del agua residual en el riego agrícola.
Pie de Gallo	Conducción de aguas residuales mediante la red de alcantarillado, la descarga se hace en fosa séptica comunal, la cual no tiene la capacidad suficiente y el agua termina vertiéndose en el suelo y en la presa San José Buenavista. No hay reúso del agua residual.
Jofrito	Conducción de aguas residuales mediante la red de alcantarillado, las cuales son tratadas en el Parque Industrial Querétaro. No hay reúso del agua residual.
La Luz	Cuentan con red de drenaje, sin embargo la fosa séptica comunal aún no está en funcionamiento. Algunas viviendas cuentan con fosas sépticas individuales, otras hacen la descarga directa en la calle. No hay reúso del agua residual.
San Isidro Buenavista	Conducción de aguas residuales mediante la red de alcantarillado, la descarga se hace en fosa séptica comunal, la cual termina llegando a la presa Santa Catarina. También existe descarga de aguas grises en las calles. Uso directo del efluente de la fosa séptica como riego agrícola.
La Barreta	Conducción de aguas residuales mediante la red de alcantarillado, la descarga se hace directamente en un arroyo. No hay reúso del agua residual.
La Monja	Conducción de aguas residuales mediante la red de alcantarillado, sin embargo, no cuentan con fosa séptica comunal, la descarga se hace directamente sobre la carretera. No hay reúso del agua residual.
Cerro de la Cruz	Conducción de aguas residuales mediante la red de alcantarillado, la descarga se hace en fosa séptica comunal. Uso directo del efluente de la fosa séptica como riego agrícola.
Corea	Conducción de aguas residuales mediante la red de alcantarillado, la descarga se hace en fosa séptica comunal, la cual termina llegando a la presa Santa Catarina. Uso directo del efluente de la fosa séptica como riego agrícola.
Estancia de la Rochera	Todas las viviendas cuentan con fosas sépticas. La descarga de aguas grises se hace directamente en las calles. No hay reúso del agua residual.
La Carbonera	Parte de la población conduce las aguas residuales mediante la red de alcantarillado, la descarga se hace en fosa séptica comunal, la cual no tiene la capacidad suficiente y el agua termina vertiéndose en el suelo. Uso directo del efluente de la fosa séptica como riego agrícola.

Loma del Chino	Conducción de aguas residuales mediante la red de alcantarillado, la descarga se hace en fosa séptica comunal. Uso directo del efluente de la fosa séptica como riego agrícola.
Presa de Becerra	No cuentan con red de drenaje. Algunas casas cuentan con fosa séptica individual, el resto cuenta con letrinas y las descargas de aguas grises se hacen directamente en los patios.
Cañada de la Monja	Todas las viviendas cuentan con fosas sépticas. La descarga de aguas grises se hace directamente en las calles y terminan en el arroyo federal que pasa por la comunidad, su destino final es la presa Santa Catarina. Algunas viviendas reúsan el agua gris para el baño y en jardines.
La Cantera	No cuentan con red de drenaje. Algunas casas cuentan con fosa séptica individual, el resto cuenta con letrinas y las descargas de aguas grises se hacen directamente en los patios.
La Estancia de Palo Dulce	Conducción de aguas residuales mediante la red de alcantarillado, sin embargo, no cuentan con fosa séptica comunal, la descarga se hace directamente sobre la carretera. Uso directo del efluente como riego agrícola.

Fuente: Elaboración propia con información obtenida en las entrevistas semiestructuradas aplicadas a delegados y subdelegados de la microcuenca Buenavista.

A pesar de contar con localidades consideradas como urbanas por el número de habitantes (mayor a 4,0000) los cuales generan un caudal promedio de 21.6 L/s, la microcuenca Buenavista no cuenta con un sitio formal para el tratamiento y descarga de aguas residuales. Esto se debe principalmente a la falta de presupuesto municipal.

“La implementación de las plantas de tratamiento no se hace de acuerdo a un número de habitantes, sino a las necesidades de la población. Sin embargo, existen plantas con una capacidad de 20 L/s, si bien es cierto todas las localidades deberían contar con una planta de tratamiento es imposible operar sistemas tan pequeños. En el sector rural y periurbano no hay nada en temas de saneamiento porque son los municipios los que se deben hacer cargo”. (Anónimo, comunicación directa, 5 de agosto de 2019).

En este sentido, las aguas residuales de las viviendas que se encuentran conectadas a la red de drenaje público se recolectan en fosas sépticas comunales. El tanque séptico es una obra por parte del gobierno para depurar las aguas residuales de las localidades de la microcuenca, sin embargo, estos sistemas se

encuentra en estado de abandono y al no darles mantenimiento, los lodos que se producen en la depuración provocan atascamiento y desbordamiento de las aguas residuales generando molestia entre la población por los malos olores, además de un impacto negativo sobre el agua y suelo, afectando a la presa Santa Catarina como vaso receptor de la microcuenca (Figura 12).



Figura 12. Desbordamiento de aguas residuales de las fosas sépticas y descarga de aguas residuales en la presa Santa Catarina. Fotos de Paola Martínez (2018).

“A pesar de que tenemos drenaje todos avientan su agua residual a la calle y toda la contaminación de San Isidro va a la presa, las coladeras están tapadas y más ahorita que hicieron la obra de la carretera, a las coladeras les vienen a hacer mantenimiento cada vez que se les echa grilla, entonces a veces se rebasan y sobre todo cuando llueve. También todas las aguas contaminadas del parque industrial y de las localidades cercanas llegan a la presa”. (M. Cruz, comunicación personal, 15 de noviembre de 2018).

Lo anterior concuerda con lo expresado por Reyna (2011), al reconocer que la política pública únicamente desarrolla tanques sépticos para el saneamiento de aguas residuales en las localidades rurales y periurbanas. Centrándose únicamente en cumplir las normas sobre el vertido de aguas residuales, sin considerar la capacidad de los ecosistemas de absorber o asimilar contaminantes (WWDR, 2017).

Esto se debe, principalmente a la falta de servicio eléctrico y a la disposición dispersa de las viviendas, lo que dificulta económicamente la conjunción de las aguas residuales en una red de alcantarillado que las conduzca a una planta de tratamiento convencional (Andrade, 2008). Sin embargo, es probable que el uso de tanques sépticos en la microcuenca Buenavista se deba a las restricciones presupuestarias y a los intereses políticos que no permiten desarrollar estudios que revelen alternativas de tratamiento frente a las existentes en la actualidad (Lahera, 2010).

Por otro lado, el volumen de aguas contaminadas de las viviendas que cuentan con fosas sépticas repercute en la economía familiar. “Aquí en Cañada de la Monja nosotros no tenemos drenaje, la mayoría de la gente por la necesidad tiene fosa séptica y pagamos a servicios públicos municipales un costo muy alto, alrededor de \$470 pesos mensuales por desazolve”. (R. Olvera, comunicación personal, 15 de noviembre de 2018). Al satisfacer el saneamiento de aguas

residuales, las familias tendrían la oportunidad de prescindir de este gasto, ahorrando en el transcurso del año la cantidad de \$5,640 pesos por este servicio.

La limitada capacidad de tratamiento y la falta de mantenimiento de los sistemas de depuración primario existentes en la microcuenca, está generando que algunos habitantes desvíen las aguas residuales a sus parcelas (Figura 13), cuyo principal cultivo es el maíz, la alfalfa y el frijol, primordialmente para el autoconsumo y para la alimentación del ganado.



Figura 13. Desviación y uso del agua residual en el riego agrícola. Fotos de Paola Martínez (2018).

“Hay personas que utilizan el agua residual en sus parcelas, como el agua corre cerca de sus terrenos pues las desvían para regar sus cultivos, sobre todo cuando no llueve; siembran maíz, frijol y garbanzo para autoconsumo, y algunos lo venden aquí en las tienditas del pueblo”. (M. Pacheco, comunicación personal, 15 de noviembre de 2018).

Encarar este problema plantea un dilema crucial, ya que por un lado, el agua residual constituye una fuente alternativa importante para el riego de los cultivos, por otro lado, la presencia de organismos patógenos hace que estas aguas desencadenen problemas de salud de origen hídrico como: fiebre tifoidea, paratifoidea, disentería, cólera, entre otras. Por lo tanto, la depuración de las aguas

residuales representaría un ahorro en cuanto a la atención médica que debe darse al tratamiento de enfermedades diarreicas provocadas por agua y productos agrícolas contaminados. Además, la relación entre los tipos de suelo y el riesgo de salinidad por el riego de aguas residuales, puede contribuir a la degradación de suelos (Delgadillo *et al.*, 2010); alterando irremediablemente las condiciones de infiltración, escurrimiento, percolación y evapotranspiración del agua (Cotler *et al.*, 2010).

Es un hecho el uso informal de aguas residuales no tratadas en el riego agrícola, lo que puede generar que la población se oponga a la depuración del agua residual antes de su uso, principalmente por falta de información. En este caso, el desafío cultural y social no es la introducción de la reutilización del agua residual sino la transición a la reutilización segura. Por lo tanto, se debe promover una transformación cultural fomentada por medio de la concientización, involucrando a los habitantes en todas las etapas del proceso para que conozcan los efectos ambientales y los posibles riesgos a la salud humana generados por los contaminantes presentes en el agua residual.

Según se pudo observar en las entrevistas muchas personas desconocen los peligros del uso del agua residual cruda, pero tienen ganas de aportar, sólo requieren que se les brinde una oportunidad de ser escuchados y de que se les demuestre que realmente se quiere hacer un cambio. Por lo que no se debe desestimar el interés que este tipo de iniciativas genera en los habitantes de la microcuenca, debido a que los proyectos comunitarios de restauración ambiental fortalecen el sentido de identidad de los habitantes en el lugar donde viven, mejorando la relación entre la sociedad y el ambiente.

En general, las actividades humanas que se desarrollan en la microcuenca Buenavista, han traído consigo una mayor generación de aguas residuales, las cuales se vierten sin tratamiento en los cauces y en los suelos, introduciendo contaminantes microbiológicos y químicos en suelos y recursos hídricos, afectando la salud humana (WWDR, 2017). Como resultado de su contaminación, la

biodiversidad y ecosistemas acuáticos muestran signos evidentes de degradación, con lo cual se han reducido en cantidad y calidad sus servicios ambientales, dificultando su uso.

La situación actual del sistema de alcantarillado público en la microcuenca Buenavista hace evidente la necesidad de planificar y gestionar adecuadamente el saneamiento de las aguas residuales. En este sentido, es necesaria la implementación de una planta de tratamiento de aguas residuales que sea accesible al nivel sociocultural de la población, que sea de bajo costo y que al mismo tiempo se convierta en una fuente alternativa de agua con nutrientes para riego agrícola, mejorando las condiciones ambientales de la microcuenca.

5.1.1 Manejo de aguas residuales en La Carbonera

De acuerdo con los datos reportados por INEGI (2010), 80 de las 111 viviendas habitadas de La Carbonera cuentan con red de alcantarillado que conduce las aguas residuales hacia una fosa séptica, único sistema tratamiento para las aguas residuales generadas por la comunidad. Actualmente el sistema de drenaje presenta azolvamientos y averías en las tuberías de los colectores.

Aunado a lo anterior, la ausencia de servicios de tratamiento provoca el escurrimiento de agua contaminada en la calle y campos de cultivos (Figura 14). Además, debido a la cercanía del sitio de vertido a las viviendas, existen afectaciones sociales por malos olores que provocan molestias entre los habitantes, y el riesgo de generación y proliferación de enfermedades gastrointestinales e infecciosas de la piel.



Figura 14. Escurrimiento de aguas residuales en La Carbonera. Foto de Paola Martínez (2018).

A pesar de los datos de las instituciones gubernamentales, este estudio reportó que únicamente 60 viviendas (54%) se encuentran conectadas al sistema de alcantarillado, ocasionando que los habitantes desarrollen otros métodos de recolección y depuración de aguas residuales (Figura 15). La diferencia entre los datos reportados por el INEGI con relación a la cobertura de drenaje ha sido encontrada en la mayoría de las localidades de la microcuenca.

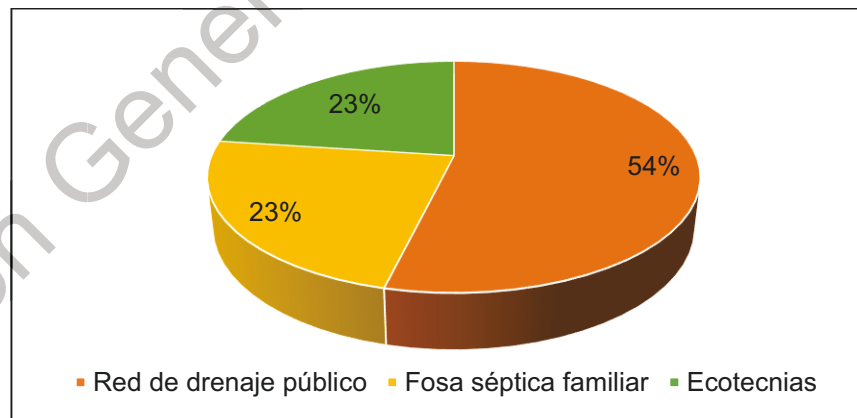


Figura 15. Métodos utilizados para la evacuación de las aguas residuales en La Carbonera.

Respecto a las ecotecnias instaladas, se cuenta con baños secos y biofiltros para el reúso de aguas grises, a través del filtrado y uso de plantas ornamentales; estas últimas dan un valor agregado al sistema y hacen que sea estéticamente

agradable a la vista. Las ecotecnias han sido gestionadas por el trabajo en conjunto entre la población e instituciones académicas, entre ellas el Centro Regional de Capacitación en Cuencas asociado a la Universidad Autónoma de Querétaro y la Universidad Politécnica de Santa Rosa Jáuregui.

El uso de ecotecnias en el 23% de las casas solventa parte del manejo inadecuado de las aguas residuales por el deficiente sistema de alcantarillado, además de representar un ahorro económico por la reducción de agua de primer uso para el riego de traspatio, lombricomposta, desalojo de los desechos humanos y para abastecer de agua a los animales del corral. Estos sistemas constituyen bajos costos de operación y mantenimiento; brindando simultáneamente una extensa gama de beneficios ambientales y sociales (Ortiz *et al.*, 2014).

En general, la gestión de la red de alcantarillado y de ecotecnias para la reducción de aguas residuales demuestra que La Carbonera es una comunidad participativa y organizada, con atributos para la gestión y búsqueda de oportunidades que facilitan el desarrollo de proyectos que mantienen el equilibrio social, ambiental y económico, preservando los recursos naturales. Además de presentar una mayor cultura del cuidado del recurso hídrico y reúso del agua residual, en comparación con el resto de las localidades que integran la microcuenca Buenavista.

Considerando lo anterior y tomando como antecedente que sólo existe la red de alcantarillado y que este servicio es deficiente, principalmente por la insuficiente capacidad y falta de mantenimiento, se eligió a la comunidad La Carbonera para la implementación de un sistema de tratamiento eficiente, con la intención de aminorar las afectaciones sociales y ambientales que generan las aguas residuales captadas por la red de drenaje.

El manejo de aguas residuales mediante sistemas de tratamiento no convencionales y ecotecnias puede representar un proceso social complejo en cuanto a la organización en otras comunidades de la microcuenca. Sin embargo, la

puesta en marcha de estas ecotecnologías en La Carbonera puede anticipar los beneficios ambientales, sociales y de salud pública, produciendo la confianza y participación de la población. Esto permitirá que el uso de ecotecnologías para el manejo de aguas residuales pueda extrapolarse en todas las comunidades de la microcuenca.

Es recomendable que antes de la implementación de las ecotecnologías se tomen en cuenta las condiciones sociales, económicas y físicas de cada una de las localidades de la microcuenca, con el fin de proponer el sistema más conveniente para cada caso en lo particular, ya que los diversos factores involucrados pueden cambiar de un lugar a otro sustancialmente y requerir soluciones distintas.

5.2 Conocer la calidad del agua residual doméstica

El análisis de las aguas residuales permitió tener una idea general del nivel de contaminación de estas aguas en la microcuenca Buenavista, las muestras se obtuvieron a la salida del tanque séptico de La Carbonera. En las Tablas 13 y 14 se presentan los resultados fisicoquímicos del agua residual doméstica.

Tabla 13. Resultados de laboratorio de las aguas residuales de la comunidad La Carbonera, en época de estiaje.

ÉPOCA DE ESTIAJE			
PARÁMETRO	RESULTADO	UNIDADES	LÍMITE PERMISIBLE
Níquel	<LC	mg/L	2
Zinc	<LC	mg/L	10
Cobre	<LC	mg/L	4
Mercurio	<LC	µg/L	0.01
pH	8.29	mg/L	5-10
Conductividad eléctrica	1881	µS/cm	-
Dureza total	149.14	mg/L	-
Nitrógeno total	79.08	mg/L	40
Fósforo total	8.24	mg/L	20
Demanda Química de Oxígeno	1538	mg/L	-
Demanda Biológica de Oxígeno	686.20	mg/L	75
Grasas y aceites	103.04	mg/L	15
Carbono orgánico total	394.54	mg/L	-
Sólidos sedimentables	0.3	ml/L	1

Fuente: Elaboración propia a partir de los resultado de laboratorio.

Tabla 14. Resultados de laboratorio de las aguas residuales de la comunidad La Carbonera, en época de lluvia.

ÉPOCA DE LLUVIA			
PARÁMETRO	RESULTADO	UNIDADES	LÍMITE PERMISIBLE
Arsénico	<LC	µg/L	0.2
Zinc	<LC	mg/L	10
Cobre	<LC	mg/L	4
Níquel	<LC	mg/L	2
Cadmio	<LC	mg/L	0.2
Mercurio	<LC	µg/L	0.01
Dureza	196.2	mg/L	-
Conductividad eléctrica	1778	µS/cm	-
pH	7.48		5-10
Nitrógeno total	0.45	mg/L	40
Carbono orgánico total	3.69	mg/L	-
Sólidos sedimentables	3.5	ml/L	1

Fuente: Elaboración propia a partir de los resultado de laboratorio.

Los valores obtenidos para el potencial de hidrógeno (pH) se encuentran dentro del rango permisible por la NOM-001-SEMARNAT-1996, cuyos valores son de 5 a 10 unidades. Por otra parte, en vertidos urbanos los rangos de pH esperados son entre 6.5 y 8.5; valores inferiores o superiores a este rango dificulta la adaptación de microorganismos en un sistema de tratamiento biológico (Torres, 2015). Además de cumplir con la normativa mexicana, los resultados obtenidos permiten la depuración del agua residual de la microcuenca por métodos biológicos.

La conductividad eléctrica no se encuentra regulada por ninguna legislación o norma mexicana. Sin embargo, Torres (2015) menciona que, como resultado del uso doméstico del agua la conductividad aumenta, y se sitúa normalmente en el intervalo 1000-2000 µSiemens/cm. En este sentido, los análisis realizados al agua residual reportaron valores que se encuentran dentro del rango aceptable para descargas de aguas domésticas. De acuerdo con Núñez (2015), valores arriba del rango recomendable puede afectar al proceso de depuración, además, la exposición de los suelos con aguas muy conductoras puede dar lugar a su inutilización.

Respecto a los sólidos sedimentables, el valor obtenido durante la época de lluvia es mayor que en época de seca, superando el límite máximo permisible por la NOM-001-SEMARNAT-1996, la cual indica un valor de 2 ml/L en agua destinada al riego agrícola. Esto muestra que se debe realizar un ajuste al sistema de depuración e incluir un tratamiento primario para la retención de los sólidos.

El valor de carbono orgánico es mucho mayor en el análisis realizado en época de seca, es importante mencionar que este parámetro no se encuentra regulado por la legislación mexicana. Sin embargo, cuando se hace la descarga de aguas residuales sin depurar, la materia orgánica que esta contiene es responsable de la degradación que se aprecia en las corrientes de agua receptoras (WWDR, 2017). Por lo tanto, el tratamiento de las aguas residuales reduciría el contenido de la materia orgánica, evitando la contaminación de los cuerpos de agua y más específicamente de la presa Santa Catarina.

El nitrógeno total encontrado en las aguas residuales de la zona de estudio es mayor que el permisible en la NOM-001-SEMARNAT-1996. A pesar de que este elemento es necesario en las aguas residuales para el crecimiento de los microorganismos, su excesiva concentración, como es el caso de este análisis, puede contribuir en el agotamiento del oxígeno y la eutrofización de las aguas receptoras (Torres, 2015).

El valor obtenido de la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO_5) se encuentra por encima del límite permisible establecido por la NOM-001-SEMARNAT-1996. Mientras que, la Demanda Química de Oxígeno (DQO) es mayor que la DBO_5 ; ambos valores representan una carga fuerte de contaminantes, lo que puede provocar el agotamiento del oxígeno disuelto en el cuerpo receptor y crecimiento de microorganismos (WWDR, 2017). En general, los resultados de estos parámetros indican que el agua es degradable y se pueden utilizar sistemas biológicos para su depuración.

El valor de fósforo total se encontró por debajo del límite permisible por la NOM-001-SEMARNAT-1996. La contaminación de agua por este elemento tiene su fuente principal en el uso de productos de limpieza con compuestos fosforados como principios activos. Es importante su monitoreo porque en concentraciones elevadas por la incorporación de aguas residuales o tratadas, estimula el crecimiento acelerado de macro y microorganismos, provocando eutrofización (Mena, 2014).

Las grasas y aceites son componentes presentes en mayor o menor medida en todas las aguas residuales domésticas. De acuerdo con la NOM-001-SEMARNAT-1996 las concentraciones se sitúan entre los 15 y los 25 mg/L. El valor encontrado en este análisis es de 103.04 mg/L. Por consiguiente, es necesario realizar un adecuado desengrase en el sistema de tratamiento para optimizar el proceso depurativo.

Con relación a los metales pesados, reportaron valores por debajo de lo establecido en la normativa mexicana, es decir, no se encontró contaminación de las aguas residuales por elementos metálicos. Esto se debe principalmente a que no se encuentran industrias conectadas a la red de alcantarillado en la zona de estudio.

Es importante mencionar que por razones presupuestarias los parámetros de DBO₅, DQO, fósforo total, grasas y aceites, únicamente fueron analizados en época de estiaje. No obstante, el resultado de la totalidad de los parámetros evaluados del efluente del tanque séptico, sirvió para proyectar el sistema de tratamiento adecuado a la zona de estudio y anticipar posibles problemas derivados de la composición del agua residual a tratar.

Los contaminantes identificados en el laboratorio sugieren que la escorrentía de las aguas residuales que desemboca en la presa Santa Catarina puede estar contribuyendo a la eutrofización, el desequilibrio en las comunidades de plantas y microbiológicas puede afectar la piscicultura que se desarrolla en este cuerpo de

agua. Es decir, los impactos ecológicos provocados por descarga de aguas residuales pueden transformarse en consecuencias económicas.

En general, conocer los elementos contaminantes del agua y cuál es su papel en el deterioro de su calidad es fundamental para poder prevenir los efectos ambientales y de salud pública que pueden producirse. En este sentido, es clave incidir en la importancia de tratar adecuadamente el agua residual, en función de sus características, antes de verterlas a un curso de agua o al suelo.

5.3 Diagnosticar la descarga de aguas residuales en suelos de una unidad de escurrimiento

El análisis de suelos permitió tener una idea general de las afectaciones de la descarga del agua residual sobre este recurso. Las muestras de suelo se obtuvieron en un campo de cultivo donde se vierten aguas residuales y en una parcela sin descarga de aguas residuales, ambos muestreos se realizaron en la comunidad La Carbonera. En la Tabla 15 se observan los resultados del análisis del suelo con y sin descarga de aguas residuales.

Tabla 15. Resultados del análisis del suelo en La Carbonera.

ÉPOCA DE LLUVIA			
TIPO DE SUELO	PARÁMETRO	RESULTADO	UNIDADES
Con descarga de aguas residuales	pH	8.37	-
	Conductividad eléctrica	201.8	μS/cm
	Materia orgánica (COT)	1.35	%
	Textura	Franco-Arena-Arcilloso	-
TIPO DE SUELO	PARÁMETRO	RESULTADO	UNIDADES
Sin descarga de aguas residuales	pH	8.48	-
	Conductividad eléctrica	126.5	μS/cm
	Materia orgánica (COT)	2.45	%
	Textura	Franco-Arena-Arcilloso	-
ÉPOCA DE ESTIAJE			
TIPO DE SUELO	PARÁMETRO	RESULTADO	UNIDADES
Con descarga de aguas residuales	pH	8.41	-
	Materia orgánica (COT)	0.02	%
	Textura	Franco-Arena-Arcilloso	-
TIPO DE SUELO	PARÁMETRO	RESULTADO	UNIDADES
Sin descarga de aguas residuales	pH	8.48	-
	Materia orgánica (COT)	0.003	%

Fuente: Elaboración propia a partir de los resultado de laboratorio.

Los valores de la materia orgánica en ambos tipos de suelos son muy bajos, sobre todo en época de sequía; traduciéndose a suelos poco fértiles. Esto coincide con lo expuesto por Céspedes *et al.* (s.f.), que explica que cuando el suelo es cultivado disminuye tanto el carbono orgánico como el nitrógeno, conduciendo a la disminución de la fertilidad.

En época de lluvia, los valores de conductividad eléctrica son mayores en suelos con descarga de aguas residuales, esto significaría que a mayor descarga de agua residual mayor contenido de sales en el suelo, sin embargo, es importante mencionar que por fallas en el equipo (conductímetro) del laboratorio no se realizó el análisis de este parámetro en época de estiaje.

Respecto al pH, el vertido de aguas residuales en el suelo contribuyó a una disminución de este parámetro, esto se observa en las dos épocas en las que se llevaron a cabo los análisis. De acuerdo con Zamora *et al.* (2008), en diversos trabajos ha sido reportada la eficiencia de las aguas residuales en disminuir el pH del suelo, lo cual es atribuido a la nitrificación del amonio proveniente del nitrógeno orgánico, la oxidación de los sulfitos y la producción de ácidos orgánicos producto de la mineralización de la materia orgánica.

La textura del suelo analizado tiene una mezcla relativamente uniforme de los tres separados textuales, la cual no cambió con la aplicación de aguas residuales. Sin embargo, la descarga constante de aguas residuales en suelos de la microcuenca Buenavista puede contribuir al incremento de materia orgánica, pero a largo plazo ocasiona salinidad, sobresaturación, desintegración de la estructura y una reducción generalizada de su capacidad productiva (Figura 16). Las consecuencias dependerán de la intensidad del uso, del nivel de contaminación del agua residual y de las propiedades del suelo (WWDR, 2017).



Figura 16. Degradación de suelo por descarga de aguas residuales. Foto de Paola Martínez (2018).

El uso de aguas residuales utilizado en la irrigación a pequeña escala presenta impactos negativos en las propiedades físico-químicas del suelo, asociados principalmente a la dispersión de agregados y a la modificación de sus propiedades hidrodinámicas debido a la acumulación de sodio, dando paso a la pérdida de capacidad de infiltración, el decremento de la porosidad e incremento de la densidad aparente (Murcia *et al.*, 2014).

El problema ambiental que presenta la microcuenca Buenavista por el vertimiento de aguas residuales, no sólo está relacionado con la contaminación del recurso hídrico, sino también en las actividades productivas como la agricultura, mediante la contaminación de cultivos que son irrigados con el efluente de los tanques sépticos existentes, generando organismos patógenos que pueden desencadenar problemas de salud provocado por productos agrícolas contaminados.

Por consiguiente, es importante plantear obras y acciones que mitiguen el impacto de la contaminación de estas descargas y mejoren la calidad del efluente garantizando el aprovechamiento del agua tratada, mitigando riesgos en la salud pública, la vulnerabilidad de la calidad del agua y suelo; permitiendo la sostenibilidad de la microcuenca Buenavista.

5.4 Diseñar el sistema de tratamiento no convencional

La contaminación del suelo y agua por descargas de aguas residuales crudas afectan la flora y la fauna de la zona. Razón por la cual, antes de ser vertidas deben recibir un tratamiento adecuado, capaz de modificar sus condiciones físicas, químicas y microbiológicas.

Al respecto, los reactores anaerobios con deflectores son oportunos para el tratamiento de una gran variedad de aguas residuales. Estos sistemas pueden combinarse con sistemas facultativos y aerobios tales como las lagunas de estabilización, biofiltros y humedales artificiales, los cuales son sistemas de bajo costo de instalación, de bajo consumo energético y permiten cumplir con los estándares de calidad a la descarga, además de que generan espacios amigables con el entorno (Sánchez, 2017).

Aunado a lo anterior y después de establecer las necesidades de la zona de estudio, se determinó que los humedales artificiales son los más adecuados para aminorar los problemas sanitarios y de contaminación en las localidades de la microcuenca Buenavista. Para que el sistema de depuración tenga una mayor remoción de contaminantes debe constar de tres tratamientos.

Por lo cual, se plantea un reactor anaerobio con deflectores para dar un tratamiento primario. El humedal artificial subsuperficial de flujo horizontal es la segunda etapa del sistema (tratamiento secundario). Finalmente, como tratamiento terciario se propone una laguna de maduración aeróbica. En la Figura 17 se representa el esquema del sistema de tratamiento propuesto.

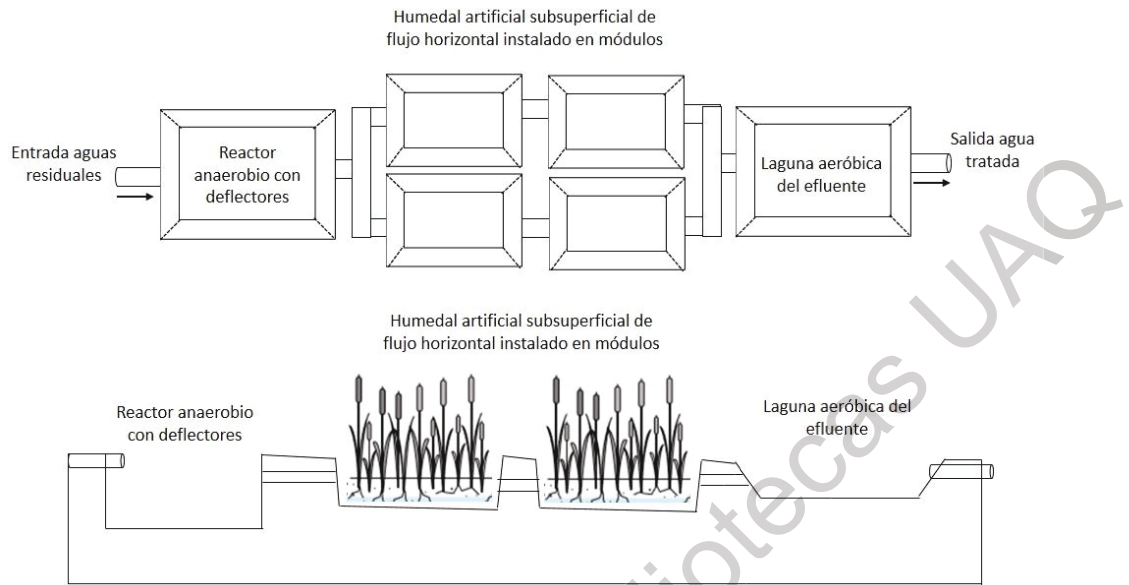


Figura 17. Posición relativa del sistema de tratamiento. Fuente: Elaboración propia.

Previo al cálculo hidráulico del sistema de tratamiento es importante conocer el caudal a tratar, el cual se realizó a partir de la información de las entrevistas, se obtuvo que son 60 viviendas habitadas en la comunidad La Carbonera que se encuentran conectadas a la red de drenaje público, y el promedio de habitantes para cada vivienda es 4, dando un total de 240 personas. Mientras que el consumo diario se estableció de acuerdo al manual de la Comisión Nacional del Agua (2016), que recomienda que para zonas rurales se considere un consumo promedio diario de 100 l/hab. En la Tabla 16 se muestra el cálculo del caudal con el que se trabajó.

Tabla 16. Cálculo del caudal para el diseño del sistema de tratamiento.

CAUDAL DE DISEÑO		
Modelo matemático	Desarrollo del modelo	Resultado
$Q_{ar} = (0.8 * \text{población} * \text{dotación}) / (1000)$	$Q_{ar} = (0.8 * 240 * 100 \text{ l/hab}) / (1000)$	19.2 m ³ /día

Fuente: Elaborado con información de Mena (2014).

5.4.1 Tratamiento primario (reactor anaerobio con deflectores)

Se continúa con la descripción de cada una de las etapas con las que contará el sistema de tratamiento, así como el cálculo hidráulico de cada una de ellas. De

acuerdo con los valores de sólidos sedimentables obtenidos en los análisis del agua residual, se propone un reactor anaerobio con deflectores como tratamiento primario (Figura 18).

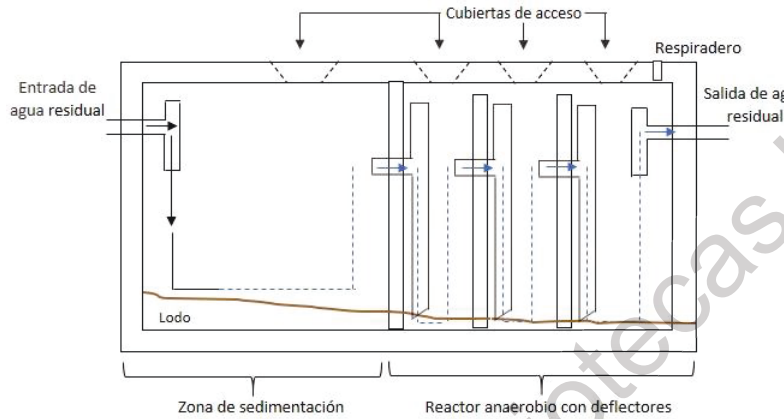


Figura 18. Reactor anaerobio con deflectores como tratamiento primario. Fuente: Elaboración a partir de información de Tilley (2011).

El reactor anaerobio con deflectores constituye una mejora a la fosa séptica, debido a una serie de cámaras de flujo ascendente en las cuales fluyen las aguas residuales. Dichas cámaras proporcionan mayor remoción de sólidos y digestión de la materia orgánica por la población bacteriana, logrando transformarla en un lodo menos ofensivo, traduciéndose a un mejor tratamiento (Tilley, 2011). En la Tabla 17 se establecen los cálculos hidráulicos para el diseño de construcción.

Tabla 17. Cálculo del volumen útil del tratamiento primario.

VOLUMEN ÚTIL REACTOR ANAEROBIO CON DEFLECTORES	
Dimensiones: Se contempla construir un tanque de cuatro compartimentos con una primera división en mampostería ubicada a los 2/3 del ingreso, de tal manera que mejore la eficiencia de retención de sólidos.	
V cámara 1: $V_1 = 2/3$	$V_u = 2/3 \times 19.2 \text{ m}^3 = 12.79 \text{ m}^3$
V cámara 2: $V_2 = 0.11$	$V_u = 0.11 \times 19.2 \text{ m}^3 = 2.11 \text{ m}^3$
V cámara 3: $V_3 = 0.11$	$V_u = 0.11 \times 19.2 \text{ m}^3 = 2.11 \text{ m}^3$
V cámara 4: $V_4 = 0.11$	$V_u = 0.11 \times 19.2 \text{ m}^3 = 2.11 \text{ m}^3$

Fuente: Elaboración propia a partir de información de Mena (2014).

Un reactor anaerobio con deflectores es apropiado cuando existe una tecnología de conducción preexistente, como una alcantarilla; donde se genera una

cantidad constante de aguas residuales. Esta tecnología puede aplicarse en viviendas, pequeños vecindarios o, incluso, en grandes cuencas (Tilley, 2011). En la Tabla 18 se establecen los parámetros operativos del reactor anaerobio con deflectores (tratamiento primario).

Tabla 18. Cálculo de las dimensiones del tratamiento primario.

DIMENSIONES FINALES REACTOR ANAEROBIO CON DEFLECTORES		
Se asume una profundidad (H) útil de 2 metros		
A=(V/H)	A= (19.2m ³ /2m)	9.6 m ²
B= √(A/2)	b= √(9.6 m ² /2)	2.19 m
L=2b	L=2(2.19m)	4.38 m
Dimensiones finales: B (ancho)=2.19m L (largo)=4.38m H=2m		
V cámara 1		
A1=(V/H)	A= (12.79m ³ /2m)	6.39 m ²
L=A1/B	L=6.39m ² /2.19m	2.91 m
V cámara 2		
A2=(V/H)	A= (2.11m ³ /2m)	1.05 m ²
L=A2/B	L=1.05m ² /2.19m	0.47 m
Se asume las medidas de la cámara 2 para las cámaras 3 y 4		

Fuente: Elaboración propia.

Para lograr la capacidad de tratamiento total, el reactor requiere de una puesta en marcha de varios meses. Para reducir el tiempo inicial este puede ser inoculado con bacterias anaerobias; por ejemplo, la adición de lodo de una fosa séptica. El mantenimiento se limita a remover el lodo y la espuma de uno a tres años. En la Tabla 19 se presentan las dimensiones asumidas para el reactor anaerobio.

Tabla 19. Dimensiones asumidas para el reactor anaerobio con deflectores.

L de la cámara 1	3.00 m
L de la cámara 2	0.50 m
L de la cámara 3	0.50 m
L de la cámara 4	0.50 m
Ancho del tanque	2.50 m
Altura útil del tanque	2 m

Fuente: Elaboración propia.

5.4.2 Tratamiento secundario (humedal artificial subsuperficial de flujo horizontal)

De acuerdo a la carga de contaminantes que presentó el agua residual de la zona de estudio, se propone la instalación de un humedal artificial subsuperficial de flujo horizontal como tratamiento secundario (Figura 19). De acuerdo con Mena (2014), estos sistemas producen hasta el 95% de eliminación de los contaminantes del efluente, generando condiciones de reutilización para uso agrícola o simplemente para descargarlas sobre los recursos naturales, sin poner en riesgo la estructura y función de los mismos.

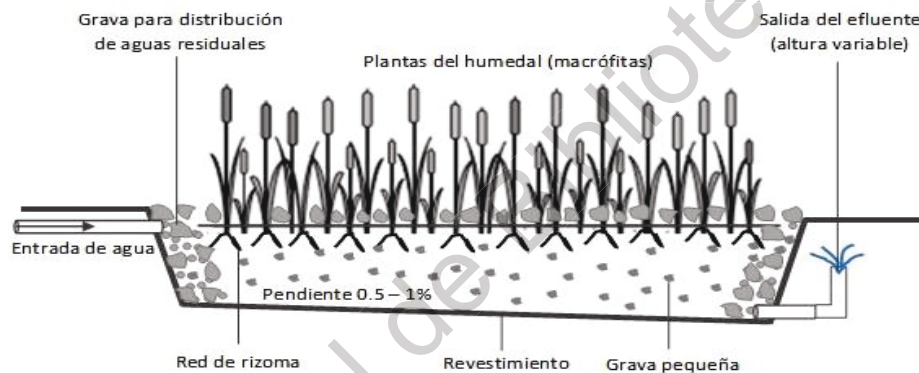


Figura 19. Humedal artificial subsuperficial de flujo horizontal como tratamiento secundario. Fuente: Elaboración a partir de información de Tilley (2011).

El tratamiento secundario estará dispuesto en módulos, en cada uno de los módulos o tanques se debe colocar una barrera impermeable (arcilla o geotextil) para prevenir la contaminación del subsuelo o el agua subterránea por lixiviación. Como soporte granular se plantea el uso de tezontle (10 cm de espesor), grava media de 1 a 2 cm de diámetro (10 cm de espesor), grava chica de 2 a 4 mm de diámetro (10 cm de espesor) y arena (30 cm de espesor). En caso de usar geotextil se recomienda colocar una capa de 5 cm de arena antes de comenzar con el llenado de grava.

En estos tanques el agua proveniente del reactor anaerobio circulará a través del medio granular (subterráneo), y en contacto con los rizomas y raíces de las

plantas. Se propone utilizar las siguientes plantas enraizadas emergentes: tule (*Typha domingensis*), totora (*Typha latifolia*) que propician aireación y presentan un importante consumo de nitratos y fosfato, y berro (*Rorippa nasturtium-aquaticum*) que sirve como alimento y para el tratamiento secundario de aguas residuales; en combinación con el alcatraz (*Zantedeschia aethiopica*). Para la selección de la vegetación se consideraron las condiciones naturales y sociales del lugar, son especies conocidas por la población porque se encuentran en la zona de estudio.

Para los cálculos hidráulicos (Tablas 20 y 21) y los parámetros operativos del humedal artificial subsuperficial se tuvo en cuenta la utilización de materiales presentes y accesibles en la zona, que permita que los resultados de eficiencia obtenidos cumplan con la normativa mexicana.

Tabla 20. Parámetros de diseño del humedal artificial subsuperficial de flujo horizontal.

PARÁMETRO	UNIDAD	VALOR
Caudal promedio (Q)	m ³ / día	19.2
Concentración de DBO ₅ afluente (Co)	mg / l	686.20
Concentración de DBO ₅ efluente (Ce)	mg / l	20
Porosidad sustrato (n)	-	0.38
Profundidad (h)	M	0.6
Temperatura promedio (T)	°C	22

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 21. Cálculo de las dimensiones del humedal artificial subsuperficial de flujo horizontal.

TEMPERATURA DE DISEÑO DEL HUMEDAL ARTIFICIAL		
Modelo matemático	Desarrollo matemático	Resultado
$K_t = (1.104/\text{día}) (1.06)^{(T-20)}$	$K_t = (1.104/\text{día}) (1.06)^{(22-20)}$	1.24 d ⁻¹
ÁREA SUPERFICIE REQUERIDA DEL HUMEDAL ARTIFICIAL		
Modelo matemático	Desarrollo matemático	Resultado
$A_s = Q (\ln C_o - \ln C_e) / (K_t * n * h)$	$A_s = Q (\ln 686.20 - \ln 20) / (1.24 * 0.38 * 0.70)$	205.82m ²
TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICA DEL AGUA EN EL HUMEDAL		
Modelo matemático	Desarrollo matemático	Resultado
$TRH = (A_s * h * n) / Q$	$TRH = (205.82 * 0.70 * 0.38) / 19.2$	2.85
HUMEDAL RELACIÓN LARGO (L): ANCHO (W)		
Modelo matemático	Desarrollo matemático	Resultado
$b = \sqrt{A_s / 3}$	$b = \sqrt{(205.82 / 3)}$	8.28m
Modelo matemático	Desarrollo matemático	Resultado
$L = 3b$	$L = 3 \times 8.28$	24.84m

Fuente: Elaboración propia.

El humedal es de fácil mantenimiento, basta con mantener el flujo del agua residual constante, podar el crecimiento excesivo de las plantas, así como remover las plantas que se vayan marchitando. En la Tabla 22 se muestran las dimensiones asumidas del tratamiento secundario.

Tabla 22. Dimensiones asumidas del humedal artificial subsuperficial de flujo horizontal.

L (largo)	25m
A (ancho)	8.5m
H (altura)	0.5m
Bordo libre con grava	0.1m
Bordo libre	0.1m
HT (altura total)	0.7m

Fuente: Elaboración propia.

5.4.3 Tratamiento terciario (laguna de maduración aeróbica)

Para proporcionar el nivel final de tratamiento se propone una laguna de maduración aeróbica (Figura 20), se trata de un sistema para remover patógenos, poco profunda lo que garantiza que la luz del sol penetre hasta el fondo para que se dé la fotosíntesis. Las algas fotosintéticas liberan oxígeno en el agua y, al mismo tiempo, consumen el dióxido de carbono producido por la respiración de bacterias (Tilley, 2011). En la Tabla 23 se establecen los cálculos hidráulicos para el diseño de construcción y los parámetros operativos de la laguna de maduración aeróbica.

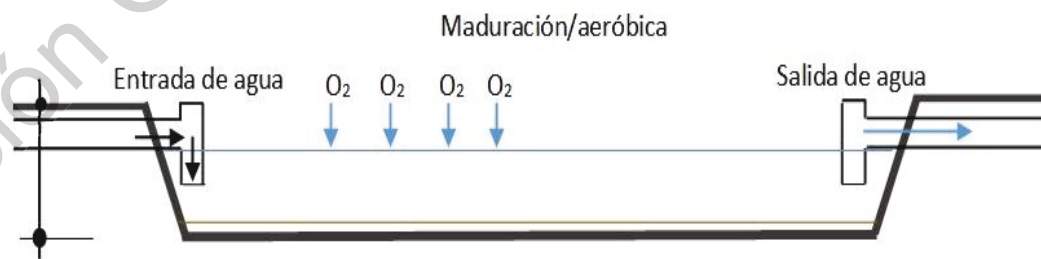


Figura 20. Laguna de maduración como tratamiento secundario. Fuente: Elaboración a partir de información de Tilley (2011).

Tabla 23. Cálculo de las dimensiones de la laguna de maduración aeróbica.

VOLUMEN DE LA LAGUNA		
Modelo matemático	Desarrollo matemático	Resultado
$V = (Q_i) (O)$	$V = (19.2\text{m}^3) (4)$	$V = 76.8 \text{ m}^3$
ÁREA DE LA LAGUNA		
Modelo matemático	Desarrollo matemático	Resultado
$A = V / Z$	$A = (76.8\text{m}^3 / 1.5\text{m})$	$A = 51.2 \text{ m}^2$
RELACIÓN LARGO (L) : ANCHO (B)		
Modelo matemático	Desarrollo matemático	Resultado
$B_{\text{prom}} = \sqrt{A/X}$	$B_{\text{prom}} = \sqrt{(51.2\text{m}^2/3)}$	$B_{\text{prom}} = 4.13\text{m}$
$L_{\text{prom}} = A_{\text{prom}}/B_{\text{prom}}$	$L_{\text{prom}} = (51.2\text{m}^2/4.13\text{m})$	$L_{\text{prom}} = 12.39\text{m}$
$B_{\text{sup}} = B_{\text{prom}} + (Z)$ (Tálud)	$B_{\text{sup}} = 4.13\text{m} + (1.5\text{m}) (2)$	$B_{\text{sup}} = 7.13\text{m}$
$L_{\text{sup}} = L_{\text{prom}} + (Z)$ (Tálud)	$L_{\text{sup}} = 12.39\text{m} + (1.5\text{m}) (2)$	$L_{\text{sup}} = 15.39\text{m}$
CÁLCULO ÁREA SUPERFICIAL		
$A_{\text{sup}} = (B_{\text{sup}})(L_{\text{sup}})$	$A_{\text{sup}} = (7.13\text{m})(15.39\text{m})$	$A_{\text{sup}} = 109.73$

Fuente: Elaboración propia.

Para evitar la lixiviación a los acuíferos, la laguna debe tener revestimiento. También es recomendable construir una protección alrededor de la laguna con el material excavado para evitar la escorrentía y la erosión. En relación al mantenimiento, la remoción de lodos se hace en promedio cada cinco años. En la Tabla 24 se muestran las dimensiones asumidas del tratamiento terciario.

Tabla 24. Dimensiones asumidas de la laguna de maduración aeróbica.

L_{sup} (largo superior)	15.50m
L_{inf} (largo inferior)	12.5
A (ancho)	7.5m
H (altura)	1.3 m
Bordo libre	0.2m
HT (altura total)	1.5m

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con Gay (2008) a la laguna de maduración aeróbica solamente llegará el 80% del agua, el 20% restante se evapora y es absorbida por las plantas. En este sentido, al final del sistema de tratamiento se obtendrán 15,360 litros de agua tratada diariamente que pueden ser utilizados en el riego de las parcelas cercanas al sistema.

La constante vigilancia de la calidad del agua tratada por medio de análisis físico-químicos y biológicos, es indispensable para mantener un control de los contaminantes del efluente del sistema de tratamiento, estos análisis deben hacerse de manera periódica. En caso de que el sistema de depuración, a lo largo del tiempo disminuya la eficiencia de remoción de contaminantes, será necesario realizar el cambio de plantas.

Por otra parte, es importante mencionar que los problemas de la depuración de las aguas residuales empiezan cuando aparece la producción de lodos, compuestos por una gran cantidad de patógenos y parásitos; razón por la cual no es prudente disponer de estos biosólidos sin tratamiento en los suelos. Como puede verse, la generación de lodos puede representar un problema, sin embargo, también puede ser generador de soluciones.

En este sentido, con el fin de hacer posible el aprovechamiento y la disposición final de los biosólidos provenientes del desazolve del reactor anaerobio y la laguna de maduración aeróbica, se propone la producción de lombricomposta que podría ser usada para mejorar la fertilidad y calidad del suelo agrícola, cuyos resultados de laboratorio indicaron un contenido bajo de materia orgánica. Además, con la venta de lombrices se obtendrían ganancias económicas.

En general, el sistema de depuración propuesto es una tecnología apropiada para comunidades periurbanas y rurales. Algunas ventajas del sistema propuesto son su fácil operación y mantenimiento, requerimiento de pequeñas áreas que disminuyen la cantidad de obra y la utilización de materiales de la región, minimizando así los costos de construcción y operación; además, no requiere de energía debido a su funcionamiento hidráulico por gravedad.

El sistema estará diseñado para mantener el nivel de agua totalmente por debajo de la superficie, razón por la cual no presentará proliferación de mosquitos y otros insectos. No existe contacto directo con aguas no tratadas o en proceso de

tratamiento y no hay presencia de malos olores causantes por la deficiencia del alcantarillado y sistema de tratamiento público actual.

Para asegurar la sostenibilidad del sistema, es imprescindible la apropiación por parte de la población beneficiada y que esta asuma sus responsabilidades en la ejecución, operación y mantenimiento. Para ello es necesario que contenga algún producto con valor agregado como la implementación de plantas ornamentales, las cuales pueden ser comercializadas. Esta estrategia asegura el mantenimiento del sistema a través de la formación de un grupo comunitario (Hernández, 2016).

Comparado con un sistema convencional el sistema de depuración con producción de flores podría resultar más atractivo para los habitantes de la microcuenca Buenavista. Con la participación de los habitantes se disminuye el costo de operación y el grupo comunitario obtendría ganancias por la venta de las flores producidas. En contraste, además de la inversión inicial para la construcción, la instalación de una planta de tratamiento de tipo convencional generaría un gasto mensual de operación. La depuración de las aguas residuales no se hará como una planta de tratamiento convencional sino como un sistema ecológico productivo que permitirá el reúso de las aguas residuales tratadas para la irrigación de los cultivos. En la Figura 21 se representa el esquema del tratamiento y disposición de las aguas residuales.

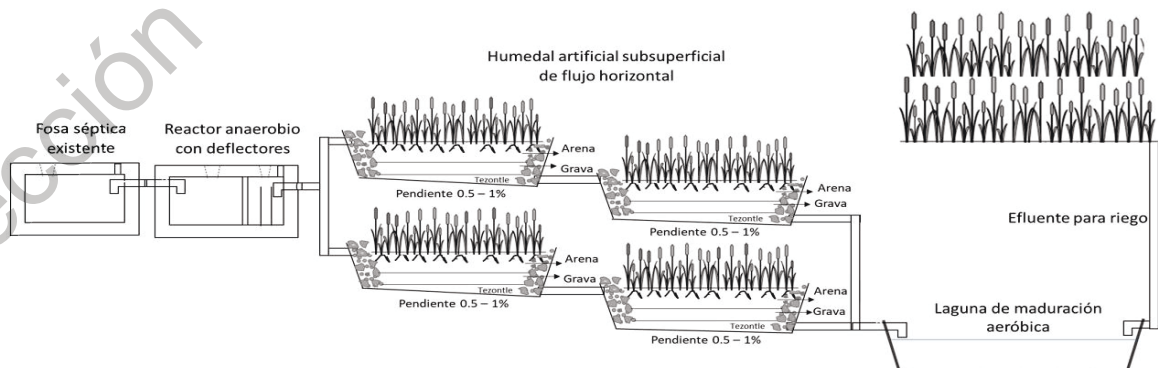


Figura 21. Sistema de tratamiento y disposición final del agua residual para riego agrícola en La Carbonera. Fuente: Elaboración a partir de la evaluación del terreno.

5.5 Prototipo sistema de tratamiento

Para probar la eficiencia de remoción de contaminantes en aguas residuales municipales, se construyó un sistema de tratamiento piloto. La instalación hidráulica consistió de un reactor anaerobio con deflectores para dar un tratamiento primario; de un humedal artificial subsuperficial de flujo horizontal como tratamiento secundario y una laguna de maduración aeróbica como tratamiento terciario.

Con la finalidad de lograr la capacidad de tratamiento total del reactor anaerobio, antes de la construcción del sistema piloto fue necesario la inoculación de lodo residual (Figura 22). Para ello se utilizó agua residual de la planta de tratamiento de la Facultad de Ingeniería del Campus Aeropuerto de la Universidad Autónoma de Querétaro, lugar donde se instaló el sistema. La inoculación del lodo se realizó durante dos meses en un recipiente de 80 litros, dicho recipiente se llenó de agua residual y se hacía el cambio de cinco litros de agua diariamente.



Figura 22. Inoculación de lodo residual. Foto de Paola Martínez (2019).

5.5.1 Descripción del sistema de tratamiento

Como reactor anaerobio se utilizó un contenedor plástico de 50 litros completamente cerrado; el reactor fue dividido en tres celdas y a la tapa del mismo se perforó un orificio de 3.4 cm de diámetro, sirviendo de respiradero y alimentación del sistema.

El humedal consistió de cuatro módulos, también se utilizaron contenedores abiertos con una capacidad de 50 litros. Para la laguna de maduración aerobia se utilizó un contenedor abierto de 30 litros.

Todos los contenedores se conectaron mediante tubos de PVC de una pulgada y se les dio una pendiente de 1 % para permitir el flujo horizontal del agua. A la salida de cada tratamiento se instaló una llave de paso que permitiera la toma de muestras de agua y así evaluar la eficiencia de depuración por separado y de manera global en el sistema, además de controlar el caudal de agua que ingresó al sistema y a cada uno de los módulos. En la Figura 23 se muestra la instalación del sistema de tratamiento a escala piloto.



Figura 23. Instalación del sistema de tratamiento. Foto de Paola Martínez (2019).

5.5.2 *Sustrato*

El material que se utilizó como sustrato (soporte para las plantas) fue grava media de 1 a 2 cm de diámetro (6 cm de espesor), tepetate (4 cm de espesor) y tierra negra (15 cm de espesor); dejando 5 cm de espacio libre para evitar la inundación de los módulos. El espesor de los materiales usado como sustrato se determinó a partir de la capacidad de los contenedores y de las raíces de las plantas instaladas. En la Figura 24 se muestra el acondicionamiento de los módulos con el sustrato utilizado.



Figura 24. Acondicionamiento de los módulos con el sustrato. Foto de Paola Martínez (2019).

5.5.3 Vegetación

La selección de las especies se llevó a cabo considerando su función estética (ornato) y capacidad para remover contaminantes (depuradora). En consecuencia, las plantas que se instalaron en el sistema fueron alcatraz (*Zantedeschia aethiopica*); mala madre (*Chlorophytum comosum*) y lirio persa (*Iris japonica*) (Figura 25).



Figura 25. Acondicionamiento de módulos con la vegetación. Foto de Paola Martínez (2019).

En la selección de los organismos también se tomó en cuenta la capacidad de los contenedores. Una vez que los módulos fueron instalados y se colocaron las plantas, se utilizó un tiempo de adaptación de 7 días. Para después canalizar el agua y lodo residual inoculado, abriendo y cerrando las llaves de paso para permitir un tiempo de residencia del agua en los humedales.

5.5.4 Evaluación de la eficiencia de remoción de contaminantes

La capacidad del sistema para la eliminación de contaminantes se realizó con base en los resultados del análisis de laboratorio. Para el cálculo del porcentaje de remoción de contaminantes se utilizó la siguiente ecuación:

$$\text{Remoción} = (\text{concentración inicial} - \text{concentración final} / \text{concentración inicial}) * 100$$

En función del tipo de aguas residuales que se sometieron a tratamiento en el prototipo instalado, los parámetros que se eligieron para evaluar fueron DBO₅, DQO, fósforo total, sólidos sedimentables y coliformes totales. No obstante, a pesar de que el análisis del nitrógeno total es fundamental, no fue posible realizarlo por fallas en el equipo del laboratorio. Se colectó una muestra del afluente del reactor anaerobio y una muestra del efluente de los cuatro módulos que representan el humedal artificial.

La DBO₅ presentó una concentración inicial de 686.20 mg/L y después de su paso por el sistema 10.66 mg/L, lo que significa un remoción de 98.45%, quedando por debajo del límite máximo permisibles por la normativa mexicana. Referente a la concentración inicial de la DQO fue de 1538 mg/L de la cual se remueve 25.02 % (1153.15 mg/L). La cantidad de DQO asimilado o fijado en el sustrato es pequeña en relación a la aportada por el agua residual. Estos resultados sugieren que el sistema de tratamiento, bajo las condiciones experimentales de este trabajo, no constituye un método efectivo para la eliminación de este parámetro. Sin embargo, puede ser removido por el sistema actual si se aplica tiempos de retención hidráulica más largos.

La concentración inicial de fósforo en el afluente fue de 8.24 mg/L y el efluente del sistema de tratamiento presentó 5.14 mg/L, quedando dentro del rango permisible por la normativa; esto significa una remoción de 37.62%. El fósforo puede ser absorbido por las plantas, puede ser aprovechado por los microorganismos o fijado en el sustrato, razón por la cual disminuye su concentración en el agua a su paso por el sistema de tratamiento.

La remoción de sólidos es muy efectiva en los humedales de flujo subsuperficial. De acuerdo con los análisis de sólidos sedimentables ingresaron en el afluente 3.5 ml/L y se presentó una reducción a 0.4 ml/L, correspondiente a una eficiencia de remoción de 88.57%, el valor obtenido es mucho menor que el citado por la NOM-001-SEMARNAT-1996.

El sistema presentó excelentes resultados de eliminación de coliformes totales, obteniendo una reducción de 925 UFC/100ml presentes en el afluente a 2 UFC/100ml en el efluente, equivalente a 99.78% de eficiencia de eliminación. Estos excelentes resultados se obtuvieron posiblemente por el avanzado crecimiento de raíces de las plantas donde se desarrollan los microorganismos como protozoarios que se alimentan de patógenos, además de procesos de sedimentación (Seoáñez, 1999; Mena, 2014). La eficiencia en el sistema de tratamiento cercano al 100% garantiza el aprovechamiento de este recurso en el riego de cultivos.

Los valores obtenidos para DBO₅, sólidos sedimentables y coliformes totales cumplen con los límites máximos permisibles por las normas oficiales mexicanas NOM-001-SEMARNAT-1996 y NOM-003-SEMARNAT-1997, presentando valores de eficiencia de eliminación mayores al 85% en cada parámetro. El sistema de tratamiento a escala piloto presentó resultados óptimos con referencia a lo reportado por Mena (2014), en donde a partir de un sistema de tratamiento integrado por una cámara séptica, un filtro anaerobio de flujo ascendente y un humedal artificial flujo subsuperficial horizontal se obtuvo 98.86% en remoción de DBO₅, 90% de sólidos sedimentables y 99.97% de coliformes totales. No obstante, la DQO a pesar no estar

contemplada en la normativa mexicana, presentó un porcentaje de remoción muy bajo. Mientras que, el porcentaje de eliminación del fósforo total fue menor al 40%, sin embargo, el valor obtenido está dentro del límite permisible por la normativa.

En general, los resultados anteriores garantizan que el diseño construido para reducir los niveles de contaminación del agua residual de la microcuenca Buenavista, puede contribuir a reducir el impacto ecológico que generan las descargas de aguas residuales sobre ambientes acuáticos y el suelo, mejorando la calidad de las mismas para su aprovechamiento en la agricultura. Además de reducir el riesgo a la salud pública y las afectaciones sociales.

Dirección General de Bibliotecas UNO

CAPÍTULO 6. EVALUACIÓN ECONÓMICA DE SISTEMAS DE TRATAMIENTO

La evaluación de los diferentes sistemas de tratamiento no debe hacerse únicamente desde la perspectiva de la ingeniería sanitaria o técnico-científica, ya que una gran cantidad de elementos intervienen y de una u otra manera influyen en el desempeño. En esta sección se realiza la evaluación económica de tres tipos de tecnologías aplicadas en el saneamiento de las aguas residuales, abordando los costos de construcción, operación y mantenimiento.

Los costos de los tres sistemas de tratamiento atienden las necesidades de la comunidad La Carbonera, que se encuentra en una unidad de escurrimiento de la microcuenca Buenavista. De acuerdo con el incremento poblacional (1.09% anual), se consideró una población de 626 habitantes asentados en 133 viviendas, las cuales generan un caudal promedio de 50.08 m³/día.

6.1 Costos de una planta de tratamiento convencional

La tecnología seleccionada para la estimación de los costos de la planta de tratamiento convencional corresponde al sistema de lodos activados modalidad aireación extendida, es el sistema más utilizado en el contexto urbano de México, el cual combina operaciones unitarias o procesos físicos, procesos biológicos y químicos.

Generalmente este tipo de plantas están compuestas por un canal Parshall para controlar el flujo en la entrada y salida del proceso; un cárcamo de bombeo del agua cruda, el agua se bombea a un tanque de aireación mecánica modalidad lodos activados aireación extendida el cual contiene 7 sopladores de lóbulos de tipo trilobular; posteriormente el agua pasa a un sedimentador secundario para la recuperación de lodos, los cuales pasan a los lechos de secado en donde son deshidratados para su disposición en un relleno sanitario; por su parte, el agua pasa a un tanque de cloración, este contiene una bomba dosificadora y un tanque de almacenamiento de cloro, como método de cloración se utiliza hipoclorito de sodio al 13 %.

6.1.1 Costos de construcción

Para calcular los costos de construcción se consideró el monto del proyecto, la obra civil y la instalación electromecánica (MIA, 2011). En este sentido, el costo de construcción es de \$1, 585,147.08. Es importante mencionar que para dar cobertura a la totalidad de habitantes de La Carbonera es necesario contemplar costos de ampliación de la red drenaje, sin embargo, por falta de información se excluye dicho gasto y el de rehabilitación de tuberías dañadas, situación que aumentaría la cifra estimada.

Por su parte, la vida útil de la planta de tratamiento es en función del crecimiento poblacional. Por lo tanto, también se deben considerar los costos de ampliación del sistema, para que sea capaz de soportar los volúmenes de agua a tratar durante los próximos 20 años, con una población de 834 habitantes en 177 viviendas, esta estimación puede aumentar los costos de construcción inicial en un 33.23% (\$526,744.37 pesos).

6.1.2 Costos de operación y mantenimiento

El mantenimiento preventivo y correctivo se realiza sobre los siguientes equipos: bomba de agua, filtro de arena, instalaciones eléctricas, aires acondicionados y bombas centrífugas. En la Tabla 25 se presentan las actividades necesarias y su frecuencia aproximada.

Para el buen funcionamiento de la planta de tratamiento se requiere dos operadores y el tiempo invertido es de ocho horas al día de lunes a sábado, con un salario de \$200.00 pesos por jornada, generando un gasto de \$9,600.00 pesos mensuales. También es necesario contemplar costos correspondientes a insumos químicos necesarios y consumo de energía eléctrica (MIA, 2011), es decir, \$15,379.02 pesos mensuales. En general el gasto mensual de operación y mantenimiento es de \$24,979.02 pesos.

Tabla 25. Actividades de la operación normal de una planta de tratamiento de lodos activados modalidad aireación extendida.

ACTIVIDAD	FRECUENCIA RECOMENDADA
Limpieza de rejillas y desarenador.	Diariamente para rejillas y para el desarenador cada cuatro días durante el estiaje; a diario en temporada de lluvias.
Extracción de los lodos del tanque de sedimentación, lodos sedimentados y digeridos hasta los lechos de secado.	Como operación normal cada 2 meses o el ajuste necesario de acuerdo a la producción de lodos.
Extracción de los lodos del tanque de sedimentación, lodos sedimentados y digeridos en recirculación al tanque de aireación.	Como operación normal cada 2 meses o el ajuste necesario de acuerdo a la producción de lodos.
Control de natas en el tanque.	Con base en la observación visual del operador.
Limpieza de muros, vertederos y mamparas.	Con base en la observación visual del operador.
Llenado de hipoclorito de sodio.	Entre 1 a 3 meses.
Muestreo y análisis.	Cada trimestre.
Limpieza general de la planta.	Se realizará de acuerdo con el programa de operación que se establezca.
Revisión general.	A la entrada de cada turno de trabajo.
Revisión de unidades de proceso.	Diariamente.
Funcionamiento de sopladores de aire.	Diariamente
Válvulas y tuberías.	Como operación normal cada 24 horas.

Fuente: MIA (2011).

6.2 Costos de una planta de tratamiento no convencional

La tecnología seleccionada para la estimación de los costos de la planta de tratamiento no convencional corresponde a un reactor anaerobio con deflectores como tratamiento primario, un humedal artificial subsuperficial de flujo horizontal para dar tratamiento secundario y una laguna de maduración aeróbica como tratamiento secundario.

6.2.1 Costos de construcción

La implementación del sistema de tratamiento basado en un humedal artificial se puede llevar a cabo con la participación de los habitantes, es decir, a través de una construcción colectiva. Para calcular los costos de construcción se consideró el monto del proyecto y de la obra civil (Haro *et al.*, 2010), la cifra estimada para la construcción del sistema es de \$1, 144,087.15 pesos. Por falta de información se

excluyen costos de ampliación de la red drenaje y rehabilitación de tuberías dañadas, lo que aumentaría la cifra inicial.

Por otra parte, se debe considerar la ampliación del humedal de acuerdo al crecimiento poblacional durante 20 años (vida útil). En este sentido, para atender una población de 834 habitantes, los costos de construcción inicial pueden aumentar hasta 33.23% (\$380,143.97 pesos).

6.2.2 Costos de operación y mantenimiento

Al no requerir de personal especializado el mantenimiento (Tabla 26) puede ser realizado por los habitantes de la localidad; se requiere de dos operadores y el tiempo invertido en esta actividad es de cuatro horas a la semana (dos visitas al sitio por semana) y una vez por mes se invierten seis horas para realizar actividades de mantenimiento mayor. Considerando un salario de \$200.00 pesos por una jornada de 8 horas, el gasto mensual para el mantenimiento es de \$1,200.00 pesos mensuales. En los gastos de operación se considera la compra de materiales de jardinería y equipo de protección personal, aproximadamente \$5,000.00 pesos.

Tabla 26. Actividades de la operación normal del sistema de tratamiento no convencional.

ACTIVIDAD	FRECUENCIA RECOMENDADA
Mantenimiento y limpieza del colector	Una vez al mes
Remoción de lodo y espuma del tratamiento primario.	De uno a tres años.
Poda y cuidados de la vegetación.	Según necesidad.
Cuidados de bordos y geomembrana.	Según necesidad.
Inspección y regulación del nivel de agua en los humedales.	Dos veces a la semana.
Remoción de lodo en el tratamiento secundario.	Cada cinco años.
Muestreo y análisis.	Cada trimestre.

Fuente: Segura *et al.* (2018).

6.3 Costos de ecotecnias para el manejo de aguas residuales

La adopción de ecotecnias es una alternativa viable para el uso y manejo del agua residual. Por lo tanto, se realizó la evaluación económica de la implementación de baños secos y biofiltros. El baño seco es un sistema de eliminación de excretas que

no necesita agua y con el cual se puede obtener abono orgánico. El sistema plantea el uso de dos cámaras alternas una activa (en uso) y otra en reposo donde se da lugar a los procesos de desactivación y mortalidad constante de organismos y patógenos.

Por su parte, el biofiltro permite el tratamiento de las aguas grises, reduciendo los impactos negativos que ocasiona la mala disposición de dichas aguas. Generalmente está compuesto por una trampa de grasas, canal de filtración o de oxidación y fosa de excedentes. El agua resultante del sistema puede ser utilizada para otras actividades dentro del mismo hogar reduciendo el consumo del agua potable, incidiendo directamente en la parte financiera al reducir volúmenes de agua que no entran al sistema de alcantarillado.

6.3.1 Costos de construcción

La implementación de ecotecnias se hará de acuerdo al número de viviendas, por lo tanto, la construcción se puede llevar a cabo por los habitantes de cada una de las viviendas, se trata de un proceso de autoconstrucción. El costo unitario de construcción de los baños secos y biofiltros es de \$14,000.00 y \$3,000.00 pesos, respectivamente. En este sentido, el costo de construcción estimado para atender la totalidad de viviendas de La Carbonera es de \$1, 862,000.00 pesos para baños secos y \$399,000.00 pesos para biofiltros.

De acuerdo al crecimiento poblacional (1.09% anual), se espera que cada diez años haya un incremento de once viviendas, generando un gasto de \$187,000.00 pesos por la implementación de ecotecnias (baños secos y biofiltros).

6.3.2 Costos de operación y mantenimiento

El mantenimiento de ambas ecotecnias puede ser realizado por los usuarios; se requiere de un operador por vivienda, el tiempo invertido para dar mantenimiento a los baños secos es de dos días cada seis meses (8 horas por día), mientras que para los biofiltros es de cuatro días cada cinco años (8 horas por día). Considerando un salario de \$200 pesos por una jornada de 8 horas, el gasto anual por operador

de los baños secos es de \$800.00 pesos, mientras que el mantenimiento de los biofiltros es de \$800.00 pesos por operador cada cinco años.

Para poder hacer la comparación con los gastos de mantenimiento de los sistemas de tratamiento de lodos activados y humedal artificial, se realizó el cálculo mensual, a pesar que el mantenimiento no se realiza con esa frecuencia. Al respecto, se considera un gasto de \$83.33 pesos por operador, dando un total de \$11,082.89 pesos mensuales. En los gastos de operación se considera la compra de materiales de jardinería y equipo de protección personal, aproximadamente \$5,000.00 pesos.

6.4 Extrapolación de costos a la microcuenca

Para conocer el costo del saneamiento de aguas residuales de la microcuenca Buenavista, se extrapolan a cada una de las localidades las cifras de construcción (Tabla 27) y mantenimiento (Tabla 28) estimadas en los tres sistemas de tratamiento desarrollados. En la columna de ecotecnias se consideran baños secos y biofiltros.

Tabla 27. Estimación de costos de construcción de los sistemas de tratamiento para cada una de las localidades de la microcuenca Buenavista.

LOCALIDAD	HABITANTES	LODOS	HUMEDAL	ECOTECNIAS
Buenavista	4115	\$10,413,282.62	\$7,523,622.73	\$14,875,488.51
Pie de Gallo	4089	\$10,347,487.88	\$7,476,085.86	\$14,781,500.00
Puerto de Aguirre	2678	\$6,776,858.05	\$4,896,296.88	\$9,680,816.09
Jofrito	1729	\$4,375,350.10	\$3,161,201.38	\$6,250,235.63
La Luz	1659	\$4,198,210.42	\$3,033,217.52	\$5,997,189.66
San Isidro Buenavista	1584	\$4,008,417.90	\$2,896,091.96	\$5,726,068.97
La Barreta	1223	\$3,094,883.27	\$2,236,060.90	\$4,421,074.71
La Monja	1159	\$2,932,926.99	\$2,119,047.08	\$4,189,718.39
Cerro de la Cruz	1003	\$2,538,158.56	\$1,833,825.90	\$3,625,787.36
Corea	917	\$2,320,529.81	\$1,676,588.59	\$3,314,902.30
Estancia de la Rochera	683	\$1,728,377.16	\$1,248,756.82	\$2,469,005.75
La Carbonera	522	\$1,320,955.90	\$954,393.94	\$1,887,000.00
Loma del Chino	423	\$1,070,429.78	\$773,388.19	\$1,529,120.69
Presa de Becerra	418	\$1,057,776.95	\$764,246.49	\$1,511,045.98
Cañada de la Monja	203	\$513,705.07	\$371,153.20	\$733,833.33
La Cantera	197	\$498,521.67	\$360,183.15	\$712,143.68
La Estancia de Palo Dulce	147	\$371,993.33	\$268,766.11	\$531,396.55
Lomas del Mirador	111	\$280,892.92	\$202,945.84	\$401,258.62
Total	22860	\$57,848,758.38	\$41,795,872.54	\$82,637,586.21

Fuente: Elaboración a partir de Haro *et al.* (2010) y Granados (2009).

Tabla 28. Estimación de costos de mantenimiento y operación de los sistemas de tratamiento para cada una de las localidades de la microcuenca Buenavista.

LOCALIDAD	HABITANTES	LODOS	HUMEDAL	ECOTECNIAS
Buenavista	4115	\$1,908,888.90	\$56,758.62	\$875,028.74
Pie de Gallo	4089	\$1,896,827.88	\$56,400.00	\$869,500.00
Puerto de Aguirre	2678	\$1,242,285.42	\$36,937.93	\$569,459.77
Jofrito	1729	\$802,058.06	\$23,848.28	\$367,660.92
La Luz	1659	\$769,586.07	\$22,882.76	\$352,775.86
San Isidro Buenavista	1584	\$734,794.66	\$21,848.28	\$336,827.59
La Barreta	1223	\$567,331.99	\$16,868.97	\$260,063.22
La Monja	1159	\$537,643.31	\$15,986.21	\$246,454.02
Cerro de la Cruz	1003	\$465,277.17	\$13,834.48	\$213,281.61
Corea	917	\$425,383.02	\$12,648.28	\$194,994.25
Estancia de la Rochera	683	\$316,833.81	\$9,420.69	\$145,235.63
La Carbonera	522	\$242,148.24	\$7,200.00	\$111,000.00
Loma del Chino	423	\$196,223.57	\$5,834.48	\$89,948.28
Presa de Becerra	418	\$193,904.15	\$5,765.52	\$88,885.06
Cañada de la Monja	203	\$94,168.76	\$2,800.00	\$43,166.67
La Cantera	197	\$91,385.45	\$2,717.24	\$41,890.80
La Estancia de Palo Dulce	147	\$68,191.17	\$2,027.59	\$31,258.62
Lomas del Mirador	111	\$51,491.29	\$1,531.03	\$23,603.45
Total	22860	\$10,604,422.92	\$315,310.34	\$4,861,034.48

Fuente: Elaboración a partir de Haro *et al.* (2010) y Granados (2009).

De acuerdo con los datos presentados en las Tablas 27 y 28, se determinan los costos de construcción por habitante, y costos de mantenimiento y operación por habitante al año (Figura 26) de cada uno de los sistemas de saneamiento desarrollados en este capítulo.

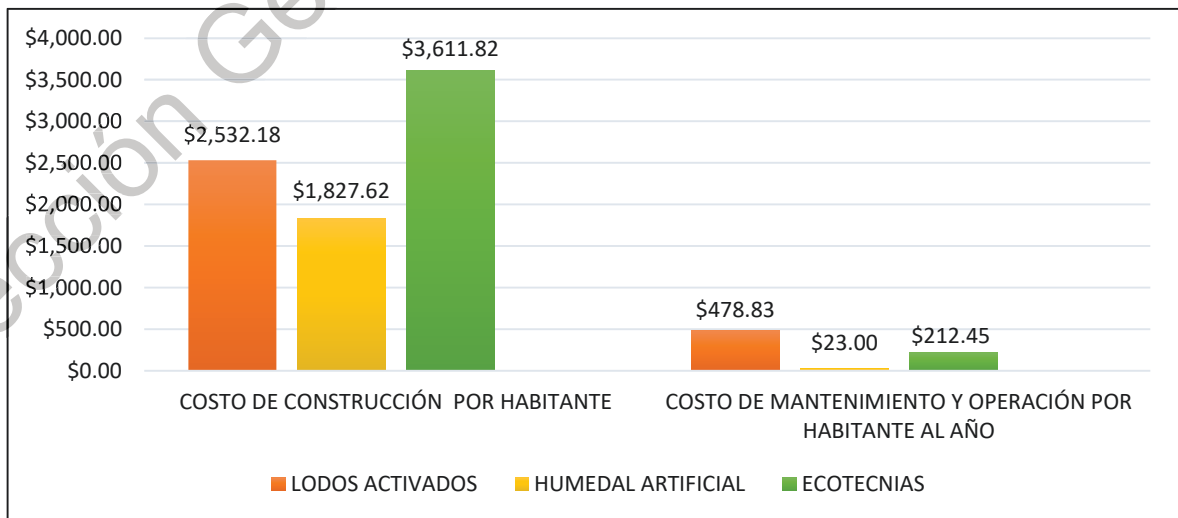


Figura 26. Comparación de costos de los sistemas de tratamiento por habitante.

La tecnología de lodos activados se basa en sistemas centralizados, en donde la inversión en la construcción y su complejidad en el proceso de tratamiento demandan altos costos para dar servicio a pequeñas comunidades rurales o áreas periurbanas. Además, los costos energéticos, de mantenimiento y operación se incrementarán con el tiempo, que a largo plazo se convertirá en una carga financiera que no será sostenible por la población (Sánchez, 2017).

Actualmente, la estrategia de depuración de aguas residuales contempla la instalación de una sola planta de tratamiento, demandando grandes terrenos y una gran inversión para la conducción de las aguas contaminadas hacia un mismo punto. Por ello, la gestión de aguas residuales debe empezar a considerar la descentralización de los servicios, siempre que sus características técnicas lo permitan (Lahera, 2010).

Los sistemas descentralizados están diseñados para operar a pequeña escala; adecuándose a las condiciones particulares del sitio. De esta forma, se evita la costosa implementación de sistemas de tratamiento centralizados en donde se tienen mayores requisitos para su construcción e instalación. Los sistemas descentralizados son los más indicados para depurar el agua residual de las comunidades en donde hay baja densidad urbana, tales como las zonas rurales o las zonas periurbanas (Sánchez, 2017).

Al respecto, los humedales artificiales y las ecotecnias planteadas (baños secos y biofiltros) muestran una viabilidad técnica y económica para tratar aguas usadas en los hogares sin hacer grandes y costosas plantas, utilizando muy poca energía y sin obtener residuos tóxicos ni generar emisiones de contaminantes al aire durante el proceso.

Dependiendo del tipo de comunidad, las opciones técnicas y los entornos locales, los sistemas descentralizados pueden reducir los efectos sobre el ambiente y la salud pública local, aumentando las posibilidades de reutilización final de las aguas residuales, promoviendo su retorno dentro de la cuenca de origen. El agua

residual recuperada y tratada en los sistemas de tratamiento permite contar con agua para riego durante todo el año, aumentando la disponibilidad de agua dulce en un nivel suficiente para satisfacer necesidades humanas y ambientales.

No obstante, algunas técnicas como el uso de ecotecnias no han logrado una relevancia, debido a prejuicios y barreras de tipo social y cultural relacionadas con temores sobre la seguridad del sistema, por considerarla como una alternativa para poblaciones de bajos recursos y además requerir mayores actividades de mantenimiento por parte de los usuarios (García *et al.*, 2014).

Por ende, será necesario trabajar en la apropiación de estos sistemas, debido a que la percepción y aceptación social son elementos fundamentales para el éxito de los sistemas de depuración. No se debe subestimar la participación de los habitantes de la microcuenca, que deben comprender los beneficios de la gestión del agua residual. A través de campañas de educación pública se puede sensibilizar a la población y será necesario dar seguimiento al proyecto, evaluar e informar constantemente sobre los riesgos al ambiente y a la salud que implica el agua residual sin tratamiento.

La clave del éxito de los sistemas descentralizados radica en la escala, en la tecnología usada y en el involucramiento de la población (Lahera, 2010). Con base a lo anterior y a las restricciones presupuestarias que presentan las localidades de la microcuenca Buenavista, se propone que la depuración de aguas residuales se haga por unidades de escurrimiento, mediante sistemas descentralizados, atendiendo las viviendas o comunidades que ahí se encuentren. Para la elección de la ecotecnología se consideró la actividad económica, número de viviendas y servicios con los que cuenta cada localidad. En la Figura 27 se presenta la implementación de sistemas de tratamiento por localidades.

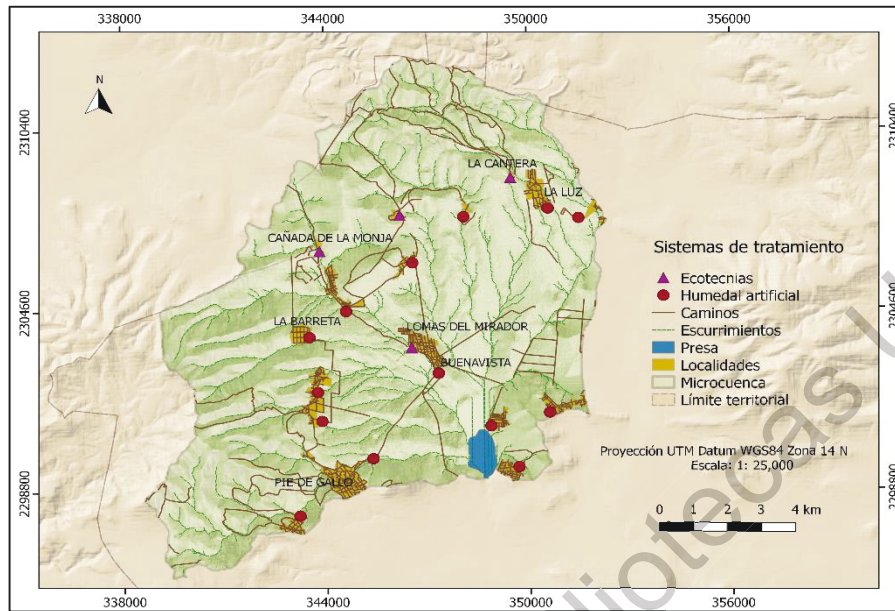


Figura 27. Implementación de sistemas de tratamiento por localidades. Fuente: Elaboración a partir de la Red Hidrográfica Nacional, INEGI (2017).

Cubrir las necesidades de saneamiento de la microcuenca Buenavista desde aguas arriba, reducirá la contaminación de los cauces fluviales, permitiendo mejorar la calidad del agua de la presa Santa Catarina, propiciando un ambiente óptimo para el desarrollo de la piscicultura y actividades recreativas. Además de permitir el reciclaje y reutilización de nutrientes esenciales para la agricultura, reduciendo el uso de fertilizantes. De modo que, el suelo recuperaría sus funciones como la producción de biomasa, biodegradación de contaminantes e infiltración de agua.

Lo anterior ayudaría a la función natural de la microcuenca, actuar como reservorio de agua, proporcionando hábitats óptimos para el desarrollo de la flora y fauna local, y ciclos biológicos para el funcionamiento de los ecosistemas nativos, manteniendo el suelo fértil y respaldando la autosuficiencia de los habitantes de la microcuenca.

Consideraciones finales

Si bien es cierto, la ejecución de infraestructuras de saneamiento de aguas residuales requiere una inversión relativamente alta, sin embargo, no es comparable con el costo que producen los efectos de la falta de saneamiento; no solamente por el deterioro en la calidad y cantidad de los recursos naturales vitales como el agua, sino porque este deterioro ocasiona costos adicionales como enfermedades y disminución en los rendimientos de actividades productivas dependientes de estos recursos (Moreno, 2009).

El saneamiento de aguas residuales debe ser sustentable, para ello no solamente se debe dar cumplimiento a las normas oficiales relacionadas con las descargas de aguas residuales tratadas, sino que igualmente debe considerarse las estimaciones de los costos de inversión, mantenimiento y operación comparados con los beneficios reales obtenidos en el corto y mediano plazo, tales como el cuidado de la salud pública, la protección de los recursos naturales y el impulso de la economía local.

CONCLUSIONES

El sistema de alcantarillado de la microcuenca Buenavista no contempla el saneamiento de aguas residuales. La falta de plantas de tratamiento para las aguas residuales ha ocasionado que aguas contaminadas se descarguen en los cauces, en suelos a cielo abierto y en el subsuelo, a través de los tanques sépticos, cuyos efluentes no cumplen con los límites permisibles por la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996.

Los efectos sobre el ambiente han ido aumentando en forma proporcional a la cantidad de aguas residuales que se vierte sin tratamiento en la microcuenca. Al respecto, se encontró un incremento de la conductividad eléctrica y el decremento de la materia orgánica en los suelos, esto puede influir en la productividad y en las propiedades hidrodinámicas de este recurso debido a la acumulación de sodio. Sin embargo, con el uso adecuado de agua tratada y su subproducto (lombricomposta) se puede recuperar la fertilidad y productiva de los suelos agrícolas, aumentando las oportunidades de seguridad alimentaria en la microcuenca.

Por su parte, la conversión de los cauces en desagües de aguas residuales provoca el ingreso de nutrientes, elementos tóxicos y microorganismos a la presa Santa Catarina, afectando su calidad y, por ende, la producción de peces. Esto repercute en la economía de la población aledaña al cuerpo de agua, cuya fuente de ingresos es la venta de peces.

Aunado a lo anterior, el vertido de aguas residuales afecta directamente a las actividades económicas desarrolladas en la microcuenca Buenavista, como la agricultura y la piscicultura. En este sentido, puede contemplarse un argumento económico para mejorar la gestión de las aguas residuales reduciendo los impactos negativos sobre los recursos naturales. Es decir, la gestión de aguas residuales debe ir más allá de la reducción de contaminantes y buscar un papel central en la economía.

Debido a que los sistemas de tratamiento de aguas residuales convencionales requieren altas inversiones para su instalación, elevados consumos de energía, así como altos costos de mantenimiento y operación, no son sostenibles para las localidades de la microcuenca. Sin embargo, las tecnologías basadas en procesos naturales de depuración y la reutilización de las mismas pueden ofrecer una perspectiva sustentable para el saneamiento de las aguas residuales de la microcuenca Buenavista.

Al respecto, el sistema de depuración basado en un humedal artificial subsuperficial de flujo horizontal y el uso de ecotecnias, ofrecen enormes oportunidades y beneficios, como el desarrollo económico, ambiental y social de los habitantes, mejorando los medios de subsistencia. Esta propuesta rompe con el esquema tradicional sectorial de la gestión del agua residual que se centra únicamente en la remoción de contaminantes, por ello incorpora la conservación, preservación y rehabilitación del funcionamiento de la microcuenca, así como la participación ciudadana.

Con la implementación del humedal artificial subsuperficial se puede producir una eficiencia de remoción de contaminantes mayor al 85%, cumpliendo con los límites máximos permisibles por las normas oficiales mexicanas NOM-001-SEMARNAT-1996 y NOM-003-SEMARNAT-1997. La calidad de los efluentes proporciona una alternativa de reutilización del agua residual doméstica en la agricultura y la recuperación de la estructura y función de la microcuenca por la disminución de descargas de aguas residuales crudas, garantizando óptimas condiciones sanitarias.

En general, la gestión de aguas residuales traerá los siguientes beneficios: a) mayor eficiencia en el uso del agua, reduciendo el volumen de aguas residuales producidas, b) eliminación de contaminantes de las corrientes de aguas residuales mediante los procesos de tratamiento, c) uso seguro de aguas residuales tratadas bajo condiciones controladas para fines productivos y d) recuperación de

subproductos útiles, como es el caso de la lombricomposta a partir del aprovechamiento de los biosólidos.

Las tecnologías de saneamiento ecológico conllevan ventajas ambientales significativas y su costo es relativamente bajo para la población. Por consiguiente, es necesario que las autoridades encargadas de los servicios básicos en zonas rurales y periurbanas consideren siempre el impacto ambiental de sus decisiones y contemplen no sólo las ganancias en los aspectos económicos a corto plazo, sino los beneficios ambientales en el mediano y largo plazo.

La participación gubernamental es fundamental para la solución de problemas sociales y ambientales ocasionados por el manejo inadecuado de las aguas residuales, sin embargo, para dar viabilidad y asegurar el éxito de los proyectos propuestos se requiere de la participación comunitaria.

Por último, es importante contemplar los aciertos y errores encontrados en la elaboración de este trabajo. En este sentido, con la metodología empleada se obtuvo información de los habitantes de la microcuenca, la cual se pudo corroborar con los recorridos por las diferentes localidades de la zona de estudio. Esto permitió el aporte de conocimiento en diferentes aspectos: 1) se conocieron las formas de desalojo y tratamiento de aguas residuales, información que actualmente es escasa; 2) se logró identificar los recursos naturales impactados por las descargas de aguas residuales y 3) se consiguió realizar el diseño de un sistema de tratamiento acorde a las necesidades de la población.

No obstante, la caracterización del agua residual y de suelo se realizó exclusivamente en la comunidad La Carbonera, estos valores no representan en su totalidad la composición de las aguas servidas de la microcuenca. Por lo tanto, se recomienda hacer futuros análisis abarcando el mayor número de localidades posibles, porque la presencia de los contaminantes puede variar de acuerdo a las características socioeconómicas de cada localidad.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acosta, C., Silván, R., Ocaña, G., Bautista, R., y Romellón, M. (2016). Tratamiento de aguas residuales por humedales artificiales tropicales en Tabasco, México. *Revista Iberoamericana de las Ciencias Biológicas y Agropecuarias: CIBA*, 5(10), 1-20.
- Andrade, M. (2008). *Eficiencia de depuración de aguas residuales en humedales artificiales de flujo sub-superficial vertical y horizontal en Punata-Cochabamba* (tesis de pregrado). Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia.
- Bunge, V. (2010). El estado de saneamiento en las Cuencas de México. En A. Garrido, N. Luna, C. Enríquez, y M. Cuevas (Eds.), *Las Cuencas Hidrográficas de México Diagnóstico y Priorización* (pp. 92-95). México: Pluralia.
- Carabias, J., y Landa, R. (2005). *Agua, medio ambiente y sociedad: hacia la gestión integral de los recursos hídricos en México*. México, D.F: El Colegio de México.
- Céspedes, C. (Sin fecha). *Relevancia de la materia orgánica*. Recuperado de <http://biblioteca.inia.cl/medios/biblioteca/boletines/NR40198.pdf>
- Comisión Nacional del Agua. (2016). *Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación*. Recuperado de <https://www.gob.mx/conagua/documentos/inventario-de-plantas-municipales-de-potabilizacion-y-de-tratamiento-de-aguas-residuales-en-operacion>
- Comisión Nacional del Agua. (2017). *Situación del Subsector Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento*. Recuperado de <https://www.gob.mx/publicaciones/es/articulos/situacion-del-subsector-agua-potable-alcantarillado-y-saneamiento?idiom=es>

- Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Querétaro. (2003). *El Sistema de Agua en la Región Querétaro de la Cuenca Lerma-Chapala*. Recuperado de <http://cqrm.concyteq.edu.mx/publicaciones/el-sistema-de-agua-en-la-region-queretaro-de-la-cuenca-lerma-chapala-diagnostico-proyecto-sustentabilidad-del-sistema-de-agua-en-el-estado-de-queretaro/>
- Cortés, F., Luévanos, A., Luévanos, R., Uranga, A., Ávila, C., y González, J. (2011). Diseño de lagunas de estabilización en serie con diferentes configuraciones. (Caso Comarca Lagunera Estado de Durango, México). *Revista de Arquitectura e Ingeniería*, 5(3), 1-15.
- Cotler, H., Garrido, A., Bunge, V., y Cuevas, M. L. (2010). Las cuencas hidrográficas de México: priorización y toma de decisiones. En A. Garrido, N. Luna, C. Enríquez, y M. Cuevas (Eds.), *Las Cuencas Hidrográficas de México Diagnóstico y Priorización*. (pp. 210-215). México: Pluralia.
- Cuevas, M., Garrido, A., Pérez, J., e Iura, D. (2010). Proceso de cambio de usos de suelo y degradación de la vegetación natural. En A. Garrido, N. Luna, C. Enríquez, y M. Cuevas (Eds.), *Las Cuencas Hidrográficas de México Diagnóstico y Priorización* (pp. 96-103). México: Pluralia.
- Delgadillo, D., Camacho, A., Pérez, L., y Andrade, M. (2010). *Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales*. Cochabamba, Bolivia: Nelson Antequera.
- Díaz, E., Alvarado, A., y Camacho, K. (2012). El tratamiento de agua residual doméstica para el desarrollo local sostenible: el caso de la técnica del sistema unitario de tratamiento de aguas, nutrientes y energía (SUTRANE) en San Miguel Almaya, México. *Quivera Revista de Estudios Territoriales*, 14(1), 78-97.
- Domínguez, J. (2010). El acceso al agua y saneamiento: Un problema de capacidad institucional local. Análisis en el estado de Veracruz. *Gestión y Política Pública*, 19(2), 311-350.

- Fideicomiso de Riesgo Compartido (2007). *Plan Rector de Producción y Conservación*. Microcuenca Buenavista, Querétaro.
- García, G., Vaca, M., y García, J. (2014). Sanitario seco: una alternativa para el saneamiento básico en zonas rurales. *Revista de salud pública*, 16(4), 629-638.
- Garzón, M., Buelna, G., Gabriela E., y Moeller, G. (2012). La biofiltración sobre materiales orgánicos, nueva tecnología sustentable para tratar agua residual en pequeñas comunidades e industrias. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 3(3), 153-161.
- Gaspari, F., Rodríguez, A., Senisterra, G., Delgado, M., y Besteiro, S. (2013). *Elementos metodológicos para el manejo de cuencas hidrográficas*. Buenos Aires, Argentina: edulp.
- Gay, L. (2008). *Captación pluvial y su reutilización mediante humedales artificiales en la microcuenca Santa Ana, Guanajuato* (tesis de maestría). Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro, México.
- González, O. (2011). Metodología para el diseño de humedales con flujo subsuperficial horizontal. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 32(1), 61-70.
- Granados, M. (2018). *Estudio de factibilidad de la implementación de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales en ecosistemas de Alta Montaña en Toquilla* (tesis de maestría). Universidad Libre, Colombia.
- Granados, M. (2009). *Sanitarios ecológicos secos como elemento de regularización de asentamientos humanos* (tesis de pregrado). Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México.
- Haro, M., y Aponte, N. (2010). *Evaluación de un humedal artificial como tratamiento de agua residual en un asentamiento irregular* (tesis de pregrado). Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México.

- Hernández, M. (2016). Humedales ornamentales con participación comunitaria para el saneamiento de aguas municipales en México. *RINDERESU*, 1(2), 1-12.
- Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos (WWDR). (2017). *Aguas residuales el recurso desaprovechado*. Recuperado de <http://unesdoc.unesco.org/images/0024/002476/247647s.pdf>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2010). *Encuesta Intercensal*. Recuperado de <http://www.inegi.org.mx/>
- Instituto Nacional de las Mujeres. (2011). *Estudio de la situación del agua desde el enfoque de género en el Estado de Querétaro*. Recuperado de http://cedoc.inmujeres.gob.mx/ftpg/Qro/QRO_META_14_ESTUDIO_AGUA_2011.pdf
- Jiménez, B. (2007). Información y calidad del agua en México. *Trayectorias*, 9(24), 45-56.
- Lahera, V. (2010). Infraestructura sustentable: las plantas de tratamiento de aguas residuales. *Quivera*, 12(2), 58-69.
- Llagas, W., y Gómez, E. (2006). Diseño de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales en la UNMSM. *Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica*, 9(17), 85-96.
- Maca, G. (2014). *Evaluación económica de un sistema de tratamiento de aguas residuales en la ciudad de Guadalajara de Buga* (tesis de pregrado). Universidad del Valle, Santiago de Cali, Colombia.
- Manifestación de Impacto Ambiental (2011). *Construcción y operación de la planta de tratamiento de aguas residuales para la ciudad de Oxtotitlán, Guerrero*. Recuperado de <http://sinat.semarnat.gob.mx/dgiraDocs/documentos/gro/estudios/2011/12GE2011HD027.pdf>

- Mena, P. (2014). *Evaluación de la eficiencia de tratamiento de aguas residuales domésticas, implementando un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) en el Colegio Comfamiliar Siglo XXI, sede campestre corregimiento de San Fernando, Municipio de Pasto, Colombia* (tesis de maestría). Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina.
- Menchaca, S., y Lozada, R. (2017). Tratamiento de aguas residuales domésticas por métodos naturales: una propuesta para las zonas rurales. *UVserva*, (3), 14-22.
- Morales, G., López, D., Vera, I., y Vidal, G. (2013). Humedales construidos con plantas ornamentales para el tratamiento de materia orgánica y nutrientes contenidos en aguas servidas. *Theoria*, 22(1), 33-46.
- Morató, J., Subirana, A., Gris, A., Carneiro, A. y Pastor, R. (2006). Tecnologías sostenibles para la potabilización y el tratamiento de aguas residuales. *Revista Lasallista de Investigación*, 3(1), 19-29.
- Moreno, M. (2009). Valoración económica del uso de tecnologías de saneamiento ecológico para aguas residuales domiciliarias. *Redibec*, 13, 1-13.
- Murcia, M., Calderón, O., y Díaz, J. (2014). Impacto de aguas grises en propiedades físicas del suelo. *Tecno Lógicas*, 17(32), 57-65.
- Núñez, A. (2015). *Caracterización de la problemática de las aguas residuales en Ixmiquilpan Hidalgo* (tesis de pregrado). Universidad Autónoma Metropolitana, Ciudad de México, México.
- ONU-HABITAT (2008). *Manual de Humedales Artificiales*. Nepal, Katmandú: Víctor Arroyo.
- Ortiz, J., Maser, O., y Fuentes, A. (2014). *La ecotecnología en México*. Michoacán, México: IMAGIA.

- Quintero, J. (2014). Evaluación de humedales artificiales pilotos de flujo horizontal y tipo superficial y subsuperficial para el tratamiento de aguas para el tratamiento de aguas residuales. *Ingenium*, 15(29), 85-112.
- Reyna, N. (2011). *Retos de la gestión sustentable de los servicios de agua y saneamiento en comunidades rurales: caso de estudio de Tacotalpa, Tabasco*. Ciudad de México, México: Naciones Unidas.
- Rodríguez, C., y Silva, M. (2015). Calidad del agua en la microcuenca alta de la quebrada Estero en San Ramón de Alajuela, Costa Rica. *Revista Pensamiento Actual*, 15(25), 85-97.
- Sánchez, J. (2017). Saneamiento descentralizado y reutilización sustentable de las aguas residuales municipales en México. *Sociedad y Ambiente*, 5(14), 119-143.
- Santiago, N. (2017). Gestión integrada de cuencas: una aproximación al desarrollo social. *Elementos*, (106), 45-50.
- Serrano, J. (2005). Consideraciones legales acerca de la situación en la que se encuentra el agua en México. En S. Quesada, y S. Whiteford (Ed), *La ecología política en la cultura del agua de Querétaro* (pp. 131-145). Querétaro, México: José Montijo.
- Silva, J., Torres, P., y Madera, C. (2008). Reúso de aguas residuales domésticas en agricultura. Una revisión. *Agronomía Colombiana*, 26(2), 347-359.
- Solano, M. (2011). *Impacto ambiental por aguas residuales y residuos sólidos en la calidad del agua de la parte media-alta de la microcuenca del río Damas y propuesta de manejo* (tesis de pregrado). Universidad Nacional, Costa Rica.
- Tagle, D., Ramírez, R., y Caldera, A. (2017). Retos sociales y ambientales en la implementación gubernamental de ecotecnias en Guanajuato, México. *Administración y Organizaciones*, 19(37), 163-184.

- Tilley, E. (2011). *Compendio de sistemas y tecnologías de saneamiento*. Recuperado de https://www.eawag.ch/fileadmin/Domain1/Abteilungen/sandec/schwerpunkte/sesp/CLUES/Compendium_Spanish_pdfs/compendio_sp.pdf
- Torres, A. (2015). *Análisis de aguas residuales*. Recuperado de http://a21-granada.org/red-gramas/images/Presentacion_ANTONIO.pdf
- Trucíos, R., Estrada, J., y Rivera, M. (2011). Interpretación del cambio en vegetación y uso de suelo. *Terra Latinoamericana*, 29, 359-367.
- Vázquez, L. (2010). *Situación del tratamiento de aguas residuales en los establos lecheros de Tijuana y los factores limitantes en su tecnificación* (tesis de maestría). El colegio de la Frontera Norte, Baja California, México.
- Velázquez, M., Ortega, M., Martínez, A., Kohashi, J. y García, N. (2002). Relación funcional PSI-RAS[†] en las aguas residuales y suelos del valle del mezquital, Hidalgo, México. *Terra Latinoamericana*, 20, 459-464.
- Zamora, F., Rodríguez, N., Torres, D. y Yendis, H. (2008). Efecto del riego con aguas residuales sobre propiedades químicas de suelos de la planicie de Coro, estado Falcón. *Bioagro*, 20(3), 193-199.
- Zurita, F., Castellanos, O. y Rodríguez, A. (2011). El tratamiento de las aguas residuales municipales en las comunidades rurales de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 2(11), 139-150.

ANEXOS

Anexo 1. Entrevista utilizada en el trabajo de campo

La entrevista tiene como objetivo conocer el uso, tratamiento y disposición final del agua residual doméstica, en la microcuenca Buenavista, Querétaro, asimismo explora la forma de resolución de conflictos que pueden haber por el mal manejo del agua residual, con la finalidad de implementar un sistema de tratamiento a través de un humedal artificial, que sea una opción de prototipo para las comunidades de la microcuenca.

1. ¿En dónde desechan el agua residual proveniente de su domicilio (lavado de ropa, cocina y baño)?
2. ¿Conoce el destino final del agua residual de su vivienda?
3. ¿Existe algún manejo público del agua residual domiciliaria?
4. ¿Utiliza el agua residual para llevar a cabo alguna actividad?
5. En caso de utilizar el agua residual, ¿cuál es la principal razón de reutilizar el agua residual?, ¿se le da algún tratamiento previo para descontaminarla antes de usarla?
6. ¿Antes o actualmente se ha implementado algún sistema de tratamiento de agua residual (biofiltro), ya sea de forma individual o colectiva?
7. ¿Existe algún conflicto entre la población por la forma de eliminación y destino final de las aguas negras?, ¿cómo dan solución a estos conflictos?
8. ¿Les interesaría implementar un sistema accesible de tratamiento de agua residual?