

UNIVERSIDAD ESTATAL DE SONORA

UNIDAD ACADÉMICA SAN LUIS RÍO COLORADO



**RECUPERACIÓN DE LA CAPACIDAD DE INFILTRACIÓN DEL SISTEMA DE
RECARGA ARTIFICIAL DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS
RESIDUALES DE SAN LUIS RÍO COLORADO, SONORA.**

TESIS

QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN SISTEMAS DE PRODUCCIÓN BIOSUSTENTABLES

PRESENTA:

LIZBETH CRISTINA HIGUERA LÓPEZ

SAN LUIS RÍO COLORADO, SONORA

JUNIO DEL 2019

UNIVERSIDAD ESTATAL DE SONORA

UNIDAD ACADÉMICA SAN LUIS RÍO COLORADO

MAESTRÍA EN SISTEMAS DE PRODUCCIÓN BIOSUSTENTABLES

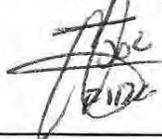


TESIS

RECUPERACIÓN DE LA CAPACIDAD DE INFILTRACIÓN DEL SISTEMA DE
RECARGA ARTIFICIAL DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS
RESIDUALES DE SAN LUIS RÍO COLORADO, SONORA.

COMITÉ REVISOR

Presidente



Dr. Jesús Arturo Sol Uribe

Secretario



M.C. Raúl Campuzano Chávez

Vocal



Dr. Lorenzo Valenzuela Vásquez

ADRADECIMIENTOS

Mis agradecimientos se dirigen a quienes han forjado mi camino y me han acompañado en esta etapa, principalmente a Dios por todas sus bendiciones, a mis padres y hermanos que con sus consejos ayudaron a darme esos ánimos que necesitaba, a mi esposo Ricardo, por su apoyo y amor incondicional cuando pensaba en rendirme.

Mi profundo agradecimiento por parte de la Universidad Estatal de Sonora, a mis asesores quienes me impulsaron a desarrollar este proyecto, y supieron guiar en momentos de dificultad y que con su conocimiento, enseñanza y colaboración permitieron el desarrollo de este trabajo, Dr. Jesús Arturo Sol, MC. Raúl Campuzano y Dr. Lorenzo Valenzuela, infinitas gracias por que incluso en los peores momentos estuvieron para mí.

A mis compañeros quienes estuvieron apoyando de una manera desinteresada, gracias por toda su ayuda y buena voluntad.

Así mismo, deseo expresar mi agradecimiento al director del Organismo Operador Municipal de Agua Potable Alcantarillado y saneamiento, Ing. Jesús Antonio Navarro por permitirme realizar este proyecto en las instalaciones de la PTAR.

Por ultimo mi gran reconocimiento y agradecimiento al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo brindado para la realización de esta investigación.

DEDICATORIA

A mi madre

Por ser el pilar más importante y por demostrarme siempre su grande amor y enseñanza de luchar por mis sueños.

A mi esposo

Porque con su apoyo alcancé de mejor manera mis metas, a través de sus consejos, de su amor, y paciencia.

El estudio de tus errores no te revelará el secreto del éxito, pero el estudio de la abnegación y el esfuerzo sí lo harán. Bernard Haldane

RESUMEN

San Luis Río Colorado, Sonora cuenta con una población de aproximadamente 192,739 habitantes (INEGI, 2015). El abastecimiento de agua a la población se realiza a través del Organismo Operador Municipal de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento (OOMAPAS), además opera la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR), constituida por tres trenes independientes, cada tren formado por una laguna anaeróbica, una laguna facultativa, dos lagunas de maduración y cuatro de infiltración, diseñada para recibir un caudal de 756 l/s. El agua residual con tratamiento secundario pasa a través de un canal hacia el sistema de recarga (lagunas de infiltración) con el fin de recargar el agua tratada en su mayor proporción al acuífero de la región.

Una vez que el sistema de recarga está operando, se presenta una disminución de la capacidad de infiltración de las lagunas, debido al fenómeno de acumulación de materia orgánica, conocido como colmatación.

Aunado a este problema el acuífero 2601 de San Luis Río Colorado, se encuentra dentro de los 105 sobreexplotados (CONAGUA, 2016a) siendo este de vital importancia para la PTAR debido a su gran aporte de agua al acuífero, en este caso OOMAPAS extrae aproximadamente 27,902,000 m³ al año de los cuales infiltra un aproximado de 9,648,000 m³ al año, con una eficiencia de recuperación de un tercio del volumen total.

La presente investigación se enfocó en un estudio en los suelos de las lagunas de infiltración con un tiempo de operación de diez años (primera etapa), y posteriormente se realizó el levantamiento de una capa de suelo colmatada (segunda etapa). Los resultados obtenidos en la segunda etapa presentaron una recuperación significativa en la infiltración del sistema. Con los resultados de las dos etapas se realizó un modelo de colmatación utilizando las variables de materia orgánica, infiltración y densidad aparente, obteniendo una ecuación con la finalidad de predecir y reducir en la operación futura la acumulación de materia orgánica en las lagunas de infiltración de la Planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR).

| INDICE | Pág. |
|--|-------------|
| ADRADECIMIENTOS | 3 |
| DEDICATORIA | 4 |
| RESUMEN | 5 |
| INTRODUCCIÓN..... | 9 |
| CAPITULO I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA | 11 |
| I.1. Justificación | 12 |
| I.2. Objetivo general:..... | 14 |
| I.2.1. Objetivos específicos | 14 |
| I.3. HIPÓTESIS | 14 |
| CAPITULO II. MARCO TEÓRICO..... | 15 |
| II.1. Aguas residuales | 15 |
| II.1.1. Etapas de tratamiento del agua residuales | 15 |
| II.2. Recarga artificial | 16 |
| II.3. Métodos de recarga | 17 |
| II.4. Colmatación y su afectación a la tasa de infiltración | 19 |
| II.5. Experiencias de recarga artificial y fenómenos de colmatación | 19 |
| II.5.1. Panorama mundial | 19 |
| II.6. Recarga artificial en México..... | 21 |
| II.7. Recarga artificial en San Luis..... | 21 |
| II.7.1. Problemática de infiltración..... | 22 |
| II.8. Infiltración..... | 22 |
| II.8.1. Ecuación general para la infiltración..... | 23 |
| II.9. Regresión..... | 24 |
| II.9.1. Regresión simple..... | 24 |
| II.9.2. Modelos de regresión lineal múltiple (RLM)..... | 25 |
| CAPITULO III. METODOLOGÍA | 27 |
| III.1. Ubicación del área de estudio | 27 |
| III.2. Etapas desarrolladas en el proyecto | 28 |
| III.2.1. Primera etapa.- Datos preliminares para proceso de remediación: | 28 |
| III.2.2. Segunda etapa.- Evaluación del proceso de remediación: | 28 |
| III.3. Determinación de parámetros | 28 |

| | | |
|---|--|----|
| III.3.1. | Materia orgánica | 28 |
| III.3.2. | Densidad real | 29 |
| III.3.3. | Densidad aparente | 30 |
| III.3.4. | Porosidad..... | 30 |
| III.3.5. | Infiltración..... | 30 |
| III.3.6. | Modelo de colmatación..... | 31 |
| CAPITULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN..... | | 32 |
| IV.1. | Materia orgánica | 32 |
| IV.1.1. | Análisis Comparativo de materia orgánica de la 1era etapa y testigo | 32 |
| IV.1.2. | Interpolación de resultados de materia orgánica (etapa 1), software Arcgis | 33 |
| IV.1.3. | Análisis comparativo de materia orgánica después de la remoción de 25 cm de suelo (segunda etapa)..... | 33 |
| IV.2. | Análisis comparativo de las propiedades físicas del suelo del sistema de recarga . | 34 |
| IV.3. | Análisis comparativo de las pruebas de infiltración | 35 |
| IV.3.1. | Punto de muestreo 2..... | 35 |
| IV.3.2. | Punto de muestreo 7..... | 36 |
| IV.3.3. | Punto de muestreo 8..... | 36 |
| IV.3.4. | Punto de muestreo 9..... | 37 |
| IV.3.5. | Punto de muestreo 14..... | 38 |
| IV.3.6. | Análisis conjunto entre los puntos de infiltración..... | 39 |
| IV.4. | Modelo de colmatación..... | 40 |
| CAPITULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES..... | | 42 |
| CAPITULO VI. BIBLIOGRAFIA | | 43 |
| CAPITULO VII. ANEXO FOTOGRÀFICO..... | | 47 |

| ÍNDICE DE TABLAS | PÁG. |
|--|-------------|
| Tabla 1. Métodos y dispositivos de recarga | 18 |
| Tabla 2. Propiedades físicas del suelo..... | 35 |
| Tabla 3. Pronostico de variables de acuerdo al grado de colmatación..... | 41 |

| ÍNDICE DE FIGURAS | PÁG. |
|--|-------------|
| Figura 1. Acuíferos sobreexplotados de México y límites del acuífero 2601. Fuente: CONAGUA (2016b)..... | 12 |
| Figura 2. Ubicación del área de estudio, San Luis Rio Colorado y la PTAR | 27 |
| Figura 3. Selección de puntos de pruebas de infiltración en la laguna ocho..... | 29 |
| Figura 4. Infiltrómetro doble anillo. | 30 |
| Figura 5. Comparativo del contenido de materia orgánica del testigo y laguna ocho..... | 32 |
| Figura 6. Distribución espacial del porcentaje de materia orgánica (primera etapa) | 33 |
| Figura 7. Porcentaje de materia orgánica después de la remoción de los 25 cm de suelo | 34 |
| Figura 8. Pruebas de infiltración en el punto dos: a) antes (primer etapa) y b) después (segunda etapa) de la remoción de la capa colmatada. | 35 |
| Figura 9. Pruebas de infiltración en el punto siete: a) antes (primer etapa) y b) después (segunda etapa) de la remoción de la capa colmatada. | 36 |
| Figura 10. Pruebas de infiltración en el punto ocho: a) antes (primer etapa) y b) después (segunda etapa) de la remoción de la capa colmatada. | 37 |
| Figura 11. Pruebas de infiltración en el punto nueve: a) antes (primer etapa) y b) después (segunda etapa) de la remoción de la capa colmatada. | 38 |
| Figura 12. Pruebas de infiltración en el punto 14: a) antes (primer etapa) y b) después (segunda etapa) de la remoción de la capa colmatada. | 39 |

INTRODUCCIÓN

El tratamiento de aguas residuales en México se ha convertido en una prioridad para garantizar que el agua residual que generan las ciudades, llegue de manera efectiva hasta las plantas de tratamiento. Actualmente se generan 6.7 miles de millones de metros cúbicos de aguas residuales al año y se espera que este volumen aumente a 9.2 miles de millones de metros cúbicos en el 2030 (De la Peña, Ducci, Zamora 2013).

La recarga artificial de acuíferos con agua residual tratada representa uno de los alcances más significativos de cualquier programa de reuso, ya que su finalidad es la de preservar los recursos, configurándose en los últimos años como una herramienta de gestión hídrica y de gran efectividad, resultando una actividad de primer orden en varios países del mundo.

San Luis Río Colorado, Sonora cuenta con una población de aproximadamente 192,739 habitantes (INEGI, 2015). El abastecimiento de agua a la población se realiza a través del Organismo Operador Municipal de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento (OOMAPAS), así también, opera la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) localizada a 6 km al sur de la ciudad, construida por tres trenes independientes, cada uno formado por una laguna anaeróbica, una laguna facultativa y dos lagunas de maduración, diseñada para recibir un caudal de 756 l/s.

El agua residual con tratamiento secundario pasa a través de un canal hacia el sistema de recarga, constituido por 8 lagunas de infiltración con el fin de recargar el agua tratada en su mayor proporción al acuífero de la región.

Una vez que el sistema de recarga está operando, se presenta una disminución de la capacidad de infiltración de las lagunas, durante este proceso se lleva a cabo la formación de una capa que abarca los primeros 25 cm de suelo de la superficie de las lagunas, dicha capa aumenta el tiempo de operación y disminuye los volúmenes infiltrados, este proceso se debe al fenómeno de acumulación de materia orgánica, conocido como colmatación. En operación normal las lagunas manejan tiempos de retención de 3 a 4 días, aumentado a 7 días de operación por este fenómeno. Aunado a este problema el acuífero 2601 de San Luis Río Colorado, se encuentra

dentro de los 105 sobreexplotados (CONAGUA, 2016) muestra su vital importancia para la PTAR debido al aporte de agua al acuífero, en este caso OOMAPAS extrae aproximadamente 27,902,000 m³ al año de los cuales infiltra un aproximado de 9,648,000 m³ al año, siendo una eficiencia de recuperación de un tercio del volumen total (Campuzano, 2015).

De acuerdo a la gran importancia de los volúmenes infiltrados y el impacto sustentable que tiene este proyecto, se realizó el estudio en dos etapas determinadas en un análisis de variables directamente relacionadas con el proceso de infiltración, en la primera etapa se determinaron las variables infiltración, materia orgánica, porosidad densidad real y aparente del suelo, mismas variables determinadas en la segunda etapa después de la remoción de la capa colmatada (25 cm), haciendo un análisis de comparación y recuperación del estado de la laguna.

De acuerdo a los resultados de materia orgánica, se recuperó su porcentaje, debido a que en la primera etapa oscilaban entre 0.5 a 2% considerados como porcentajes altos (suelo colmatado) en comparación al testigo con valores 0.1 a 0.24%, su recuperación en la segunda etapa fue del orden 0.23 y 0.225% con valores muy similares al testigo.

La densidad aparente y densidad real disminuyeron en la segunda etapa del proyecto, permitiendo que el porcentaje de porosidad del suelo aumentara y favoreciera al sistema debido que a mayor porosidad se obtiene una mejor infiltración.

Los resultados de infiltración presentan una recuperación en la segunda etapa después del levantamiento de la zona colmatada, presentan una dinámica tal, con valores de infiltración que oscilan entre los 3 y 6.5 m/d, teniendo una recuperación de 4 hasta 7 m/d.

Con los resultados de las variables analizadas, se realizó un modelo de colmatación que tiene como finalidad obtener la ecuación predictora de la colmatación para poder tomar las medidas preventivas adecuadas para la mejor operatividad del sistema y alargar su vida útil.

CAPITULO I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) de San Luis Río Colorado está conformada por un sistema lagunar que consiste en tres trenes independientes, cada tren cuenta con una laguna anaeróbica, una facultativa y dos de maduración diseñadas para un tiempo de retención total de 29 días, con el fin de depositar su efluente en lagunas de infiltración para la recarga del acuífero de la región, donde se ha observado una disminución de los volúmenes infiltrados e incrementos del tiempo de infiltración, esto debido a la colmatación de suelos, compuestos principalmente por materia orgánica.

La colmatación de la superficie de las lagunas de infiltración definida como la acumulación de los sólidos suspendidos del agua infiltrada reduce la capacidad de recarga y representa el mayor problema en los sistemas de recarga artificial de acuífero, así mismo, como lo mencionan Díaz, Gómez, Cachero y Castaño (2000) en estos sistemas de recarga la afectación por la colmatación sobre la tasa de infiltración es tan importante que incluso en los casos donde se opera con una alta concentración de sólidos en suspensión es necesario programas de limpieza y descolmatado de las instalaciones.

El problema presenta una dinámica tal, que a medida que la colmatación va aumentando, la capacidad de infiltración va disminuyendo. La disminución de la capacidad de infiltración por la colmatación del sistema, ocasiona que se incrementen los tiempos y disminuyan los volúmenes de recarga al acuífero, haciendo ineficiente su operación. En el caso de la PTAR, se ha observado un incremento en el tiempo requerido para la infiltración, ya que inicialmente se requerían de 3 a 4 días de tiempo de retención, y actualmente son de 7 días.

Con la integración del sistema de recarga artificial de la PTAR, se colabora en gran parte a la recuperación del acuífero, por lo que es de suma importancia el buen funcionamiento del sistema para garantizar los volúmenes de infiltración.

I.1. Justificación

La recarga artificial hacia un acuífero con agua residual tratada, es una forma de evitar su sobreexplotación, además de otros beneficios como evitar la intrusión marina, y un método efectivo de depuración de aguas (Fernandez, 2010).

Una de las maneras más importantes de reducir los problemas de sobreexplotación, es recargar artificialmente los acuíferos mediante el tratamiento del agua residual. Las técnicas de recarga de agua hacia un acuífero no son suficientes para poder satisfacer los volúmenes requeridos y evitar su deterioro, además la demanda cada día es mayor, ya que la sociedad, industrias y desde luego el gran volumen de líquido que se necesita para la agricultura, causan una extracción continua y excesiva de un acuífero determinado (Mendoza, 2012).

La Comisión Nacional del Agua (2016b) menciona que en México de 653 acuíferos se reportan 105 sobreexplotados (Figura 1), esto en función de la relación extracción/recarga, bajo el entendido de que la sobreexplotación es una extracción mayor que la recarga, se define si los acuíferos se convierten en sobreexplotados o dejan de serlo.

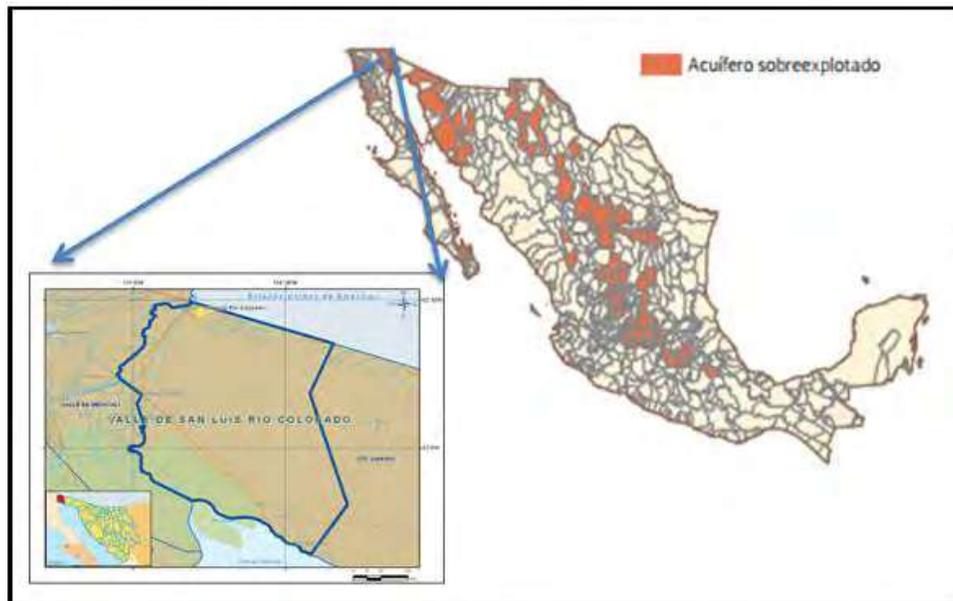


Figura 1. Acuíferos sobreexplotados de México y límites del acuífero 2601. Fuente: CONAGUA (2016b).

El acuífero 2601 de San Luis Río Colorado, se encuentra dentro de los 105 sobreexplotados, siendo este de vital importancia para la PTAR debido al gran aporte de agua al acuífero, en este caso OOMAPAS extrae aproximadamente 27,902,000 m³ al año de los cuales infiltra un aproximado de 9,648,000 m³ al año, siendo una eficiencia de recuperación de un tercio del volumen total (Campuzano, 2015).

El proceso de infiltración que se lleva a cabo en PTAR San Luis Río Colorado es referente nacional para que la CNA (Comisión Nacional del Agua) aplique estándares para la recarga de acuíferos en otros lugares.

La disminución de la capacidad de infiltración del sistema de recarga artificial de la PTAR de San Luis Río Colorado, ocasiona que aumenten los tiempos de operación de las lagunas de 4 a 7 días, disminuyendo los volúmenes infiltrados, que terminan evaporándose, estimándose esta pérdida en 31,000 m³ al año.

En este sentido, fue necesario realizar estudios para entender la dinámica de la colmatación, realizando labores preventivas de tal manera que se logre la recuperación de la capacidad de infiltración, la pérdida de operatividad del sistema puede conducir al abandono de las instalaciones, misma situación que afirman Murillo, Orden, Armayor y Castaño (2000).

Este estudio permitió que la PTAR recupere valores de infiltración para tener un mejor aporte al acuífero, debido a que una buena operación del sistema de recarga garantiza mejores resultados a la hora de los análisis externos que acreditan a la Planta de tratamiento de Aguas Residuales, debido a que actualmente se están llevando a cabo trámites ante CONAGUA para permitir compensaciones en función de los volúmenes infiltrados al acuífero.

I.2. Objetivo general:

Evaluar la capacidad de las lagunas de infiltración de la Planta Tratamiento de Aguas Residuales de San Luis Río Colorado para recuperar y mantener la operatividad del sistema de recarga de agua al acuífero.

I.2.1. Objetivos específicos

- Caracterizar la eficiencia del sistema de recarga, mediante pruebas de infiltración.
- Analizar las características físicas del suelo y su efecto en la infiltración.
- Realizar un modelo de colmatación en base a los resultados obtenidos.

I.3. HIPÓTESIS

La infiltración del sistema de recarga se recuperará quitando la colmatación del suelo.

CAPITULO II. MARCO TEÓRICO

II.1. Aguas residuales

El crecimiento acelerado de la población, especialmente en países en vía de desarrollo; la contaminación de los cuerpos de agua superficial y subterránea; la distribución desigual del recurso hídrico y los graves períodos secos; han forzado a buscar nuevas fuentes de abastecimiento de agua, considerándose a las aguas residuales una fuente adicional para satisfacer la demanda del recurso. (Parra y Chiang, 2013).

Las aguas residuales son una importante fuente adicional para satisfacer la demanda del recurso, a causa de la disponibilidad limitada de agua potable para cubrir los requerimientos de las poblaciones, los bajos costos, los beneficios para los suelos agrícolas y la disminución del impacto sobre el ambiente (Campos, 2011). Contienen material suspendido y componentes disueltos, tanto orgánicos como inorgánicos, los constituyentes convencionales presentes en aguas residuales domésticas son: sólidos suspendidos y coloidales, materia orgánica e inorgánica medida como demanda química y bioquímica de oxígeno (DQO y DBO, respectivamente), carbono orgánico total (COT), nitrógeno (amoniaco, orgánico, nitritos y nitratos), fósforo, bacterias, protozoarios y virus. La cuantificación de estos componentes es condición necesaria para definir una estrategia de tratamiento que garantice técnica y económicamente una calidad del agua residual tratada adecuada para su uso posterior y para minimizar el riesgo potencial para la salud pública y el ambiente (Silva, Torres y Madera, 2008).

II.1.1. Etapas de tratamiento del agua residuales

1. Tratamiento preliminar. En esta etapa se retiran los sólidos como maderas, papel, trapos y plástico, se lavan, se secan y se llevan para eliminarlos a un botadero de basura autorizado. El cascajo y la arena que puedan dañar las bombas también se sacan y eliminan de manera similar.
2. Tratamiento primario. Los sólidos restantes se separan del líquido pasando el agua residual a través de grandes estanques de decantación, donde la mayor

parte de la materia sólida se precipita al fondo. Más o menos 70% de los sólidos se decanta en esta etapa y se les llama “lodos”, que son usados en la agricultura después de pasar por un nuevo tratamiento llamado “tratamiento de lodos”.

3. Tratamiento secundario. Es un proceso biológico basado en microorganismos que existen naturalmente y que descomponen la materia orgánica y purifican el líquido. En un proceso simple de saneamiento, estos microorganismos se reproducen en piedras sobre las que se escurren lentamente las aguas residuales. Los microorganismos necesitan oxígeno para desarrollarse y se alimentan de las bacterias del agua residual, con lo cual purifican el agua. Estas unidades de tratamiento se llaman filtros de percolación. Este proceso se puede acelerar soplando aire en el interior de los estanques de aguas residuales, donde los microorganismos flotan libremente y se alimentan de bacterias. Estas unidades de tratamiento se llaman estanques de aireación. Después de cualquiera de las formas de tratamiento secundario, el agua residual se decanta en estanques para separar el lodo biológico del agua residual purificada. A veces es necesario un tratamiento adicional para darle un “toque final” al agua residual, el cual se conoce como tratamiento terciario y en el que se usan varios métodos como filtros de arena, lechos de caña o lotes de pasto (Silva, Torres y Madera 2008).

II.2. Recarga artificial

En líneas generales, una visión más práctica descrita por Bouwer y citada por Fernández y García (2009) mencionan que “la recarga artificial de acuíferos consiste en disponer agua superficial en balsas, surcos, zanjas o cualquier otro tipo de dispositivo, desde donde se infiltra y alcanza el acuífero”.

La recarga artificial, puede llevarse a cabo en cualquier tipo de acuífero, con un único requisito de que se posea de un espacio intergranular libre que pueda ser rellenado por el agua de recarga. Sin embargo, no todos los acuíferos son adecuados para realizar una recarga artificial puesto que la efectividad de esta técnica está ligada con la calidad del agua inyectada y con las características hidrogeológicas,

hidrodinámicas y de almacenamiento del acuífero receptor, así como al régimen de explotación al que se encuentra sometido. De este modo es preciso destacar que el agua recargada debe permanecer en el acuífero el tiempo suficiente para permitir su utilización posterior y, además, su calidad final debe ser la adecuada para los usos a los que se destine (Valcarce, González y Díaz, 2018).

II.3. Métodos de recarga

Los procedimientos ideados para poder llevar a la práctica esta técnica con múltiples y variados, aunque resulta muy clásico el establecimiento de dos grandes grupos de métodos (tabla 1) en función de que la recarga se efectúe bien por infiltración a través de la superficie del terreno, o bien por introducción directa del agua hasta el acuífero mediante una perforación que lo atraviesa.

Los métodos de recarga en superficie consisten en extender el agua buscando una gran superficie de contacto agua-terreno. Se emplean fundamentalmente en acuíferos libres, que no presentan niveles de baja permeabilidad en las proximidades de la superficie del terreno, lo que permite la llegada del agua al acuífero.

Los métodos de recarga en profundidad, consisten en la introducción de agua en el acuífero, generalmente mediante pozos, sondeos, etc. Se emplean de una forma generalizada en terrenos formados por una alternancia de niveles permeables e impermeables. La comparación entre las diversas modalidades de recarga artificial solamente se puede realizar de una forma orientativa, puesto que cada experiencia presenta unas características y un entorno diferente.

Tabla 1. Métodos y dispositivos de recarga

| | | | |
|------------------------|-------------------|--|---|
| MÉTODOS SUPERFICIALES | EN CAUCES | SERPENTEOS | Se fundamenta en aumentar el tiempo y la superficies de contacto entre el agua y el terrero, bien mediante la construcción de diques o bien de muros de tierra en forma de L. |
| | | REPRESAS | |
| | | ESCARIFICACION | Consiste en escarificar el lecho del rio eliminando finos y mejorando la infiltración. |
| | | VASOS PERMEABLES | Son embalses de superficie cuya cerrada no es totalmente impermeable. |
| | FUERA DE CAUCES | BALSAS | Son dispositivos alargados, poco profundos, y de gran superficie. La infiltración se produce predominantemente por el fondo. |
| | | FOSAS | Son semejantes a las balsas, pero la superficie lateral es importante domina la infiltración por los flancos/ |
| | | CANALES | Son dispositivos poco profundos que siguen la topografía del terreno. La infiltración se produce tanto en el fondo como por los flancos. |
| | | CAMPOS DE EXTENSION | Se basan en extender agua por la superficie del terreno, normalmente mediante riego con grandes dotaciones. |
| MÉTODOS EN PROFUNDIDAD | POZOS Y SONDEOS | Mediante la realización de una perforación más o menos profunda se introduce agua en el acuífero. | |
| | SIMAS Y DOLINAS | Consiste en aprovechar las simas y dolinas de los terrenos calcáreos para introducir agua en el acuífero | |
| | DRENES Y GALERIAS | Consiste en realizar en el fondo de un pozo, por el que se introduce el agua, drenes y galerías horizontales. | |
| | ZANJAS Y SONDEOS | Este dispositivo consiste en una gran zanja de infiltración de escasa profundidad, rellena de grava calibrada, dentro de la cual se ubican sondeos de recarga. | |

Fuente: López et al., (2004)

La recarga inducida puede considerarse como un tercer método de recarga artificial o como un caso particular de recarga a través de métodos superficiales. Consiste en provocar la infiltración natural, que tiene lugar desde ríos, lagos o embalses, mediante pozos de bombeo situados relativamente cerca de dichas masas de agua (Fernández et al., 2010).

II.4. Colmatación y su afectación a la tasa de infiltración

La colmatación es definida como la acumulación de sólidos suspendidos contenidos en el agua residual del afluente, que obstruyen los poros del terreno y disminuye la permeabilidad del suelo (Soriano, 2009), siendo el principal problema en las estructuras de recarga artificial tanto superficiales como profundas, minimiza de forma drástica la capacidad de infiltración de medios porosos en periodos de tiempo cortos (Fernández, 2005). Cuando la colmatación es muy intensa y excede los previstos, estamos frente a un caso de colmatación acelerada, en este caso se trata de un problema que afecta al proyecto mismo, no sólo en su economía sino en su razón de ser (García y Maza, 1985). Además Fernández y García (2009) afirman que la colmatación generalmente está motivada por la interacción e interdependencia de varios mecanismos: físicos, químicos y biológicos, que con frecuencia son difíciles de distinguir por lo que la cuantificación de la colmatación debe constituir, por si misma, un indicador medioambiental de primer orden en todas las operaciones de recarga artificial tanto superficial como profunda.

Con el transcurso del tiempo y tras un cierto volumen de agua recargada, puede llegar el punto en el que sea necesario abandonar los dispositivos de recarga, como lo indican algunos datos proporcionados por instalaciones americanas, debido al problema de colmatación, la vida útil en las balsas es ligeramente superior a diez años y en los pozos de cinco a diez años. No obstante, en las grandes infraestructuras pueden alcanzarse hasta veinte o más años (Rodríguez, 2013).

II.5. Experiencias de recarga artificial y fenómenos de colmatación

II.5.1. Panorama mundial

El uso de los sistemas de recarga artificial son relativamente recientes, fueron desarrollados en Europa y Estados Unidos en la década 1950-1960, durante la última década adquirieron cada vez mayor aplicación y aceptación en diferentes regiones del mundo (CONAGUA, 2007). Estado Unidos es el país donde la recarga artificial ha adquirido mayor desarrollo a nivel mundial, existen varios proyectos de recarga artificial integrados en esquemas de utilización conjunta de aguas superficiales y subterráneas de gran tamaño en varias zonas del país. Los más representativos son

los que se localizan en el valle de San Gabriel, en los alrededores de Phoenix, Salt River Valley localizado en el Estado de Arizona y otra experiencia muy interesante es la observada en el condado de Washington donde la recarga se realiza utilizando agua almacenada en un embalse de regulación y almacenamiento, el objetivo de esta experiencia es el estudio y cuantificación del fenómeno de colmatación, la cual ha avanzado rápidamente debido al alta acumulación de sedimentos, teniendo una pérdida de 35 por ciento de almacenaje en 14 embalses estudiados. Se realizó la construcción de nuevos embalses, sin embargo, no se ha logrado la recuperación de la capacidad de almacenaje si no que más bien ha compensado la pérdida de capacidad en embalses existentes (USGS, 2009).

En España los primeros antecedentes de recarga artificial datan, al menos, desde la época árabe, las primeras instalaciones de recarga artificial se construyeron en la época moderna en 1969, están situadas en Cornellá y en los alrededores de Barcelona (Fernandez, 2003).

En Israel existen proyectos que aprovechan agua de inundaciones para hacer la recarga en los acuíferos de Schiquma, al norte de Gaza cerca de Cesarea.

Un primer proyecto consta de una presa que retiene el agua de inundación, para ser distribuidas en estanques de infiltración intercalados sobre las dunas arenosas en la costa produciendo una colmatación en la base de los estanques.

En la región El Dan, se encuentra la planta de Sharfdan donde se implementó un proyecto para el rehúso indirecto de agua tratada para realizar la recarga del acuífero, con el objeto de extraerlo en un futuro con un fin agrícola. El tratamiento previo a la infiltración tanto del agua como del suelo, son factores importantes para que la calidad del agua sea de mejor calidad. Cabe destacar que se implementó una recarga de manera intermitente mediante lagunas de infiltración. La planta actualmente da servicio a una población de más de 2 millones de personas. Está considerada la mayor y más avanzada de su clase en Oriente Medio y trata unos 130 millones de metros cúbicos de aguas residuales por año (CONAGUA, 2016b).

II.6. Recarga artificial en México

En el norte, el noroeste y centro de México los acuíferos y los fenómenos hidrometeorológicos son la fuente principal de abastecimiento de agua, los acuíferos solo representan el 20% del total del agua disponible en México, satisfacen más de 60% de abastecimiento de agua para uso público urbano y 58% de las zonas industriales, y aportan más de 35% de agua al riego agrícola. Sin embargo, el problema de la sobreexplotación de los acuíferos en México es cada año más alarmante: 32 acuíferos en 1975 y 105 en 2013 (CONAGUA, 2016b).

Los antecedentes directos más recientes sobre el manejo de recarga artificial en México se desarrollan en diversas regiones tales como: San Luis Río Colorado, la Región Lagunera, San Luis Potosí, el Valle de México y los Valles Centrales de Oaxaca (CONAGUA, 2010).

II.7. Recarga artificial en San Luis

La Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) de San Luis Río Colorado, fue diseñada para cumplir con los parámetros específicos bajo la norma oficial Mexicana NOM-001-ECOL-1996, para la descarga de efluentes a ríos, a pesar de que el agua residual tratada está recargando el Acuífero de San Luis Río Colorado mediante sistemas lagunares y no a un río. Antes de la construcción de la PTAR se llevó a cabo un plan piloto que indicó la factibilidad de la tasa infiltración para la propuesta del Tratamiento del Acuífero en Suelo (SAT: Soil Aquifer Treatment), (CONAGUA, 2014).

Actualmente la PTAR tiene operando 7 años, fue diseñada para recibir un caudal total de 756 l/s; el sistema está constituido por tres trenes independientes. El caudal de diseño para cada etapa es de 378 l/s y el de cada tren de tratamiento de 189 l/s. El tren de tratamiento está formado por una laguna anaeróbica, una laguna facultativa, dos lagunas de maduración y un sistema de recarga con 8 lagunas de infiltración.

II.7.1. Problemática de infiltración

En las lagunas anaeróbicas se remueve la mayor parte de la materia orgánica suspendida, así como una fracción de los coliformes presentes en el agua cruda. La materia orgánica, los coliformes y los huevos de helminto que no son removidos en la laguna anaeróbica, son eliminados en gran parte en las lagunas facultativas; las lagunas de maduración reciben el efluente de las lagunas anteriores y sirven para remover coliformes, huevos de helminto y materia orgánica para cumplir con la calidad que fija la normatividad vigente. Una vez tratada el agua en el sistema lagunar pasa a través de un canal elevado hacia el sistema de recarga artificial que consiste en camas o lechos de arena de una superficie de 110 m por 110 m, el agua depositada aquí es descargada en su mayor proporción al acuífero de la región que se encuentra en un valor promedio de 22 m, estudios realizados por la CONAGUA (2010) han demostrado que a esta profundidad el agua llega con una calidad que cumple con norma para este fin.

Los parámetros a controlar para que las camas de infiltración funciones bien son el pH, SST y el Nitrógeno Total. La mayor parte de los SST que salen de la planta son organismos biológicos en su totalidad algas microscópicas (Campuzano, 2015).

Estudios realizados en el sistema de recarga de la PTAR mediante perfiles de suelo cada 5 cm hasta una profundidad de 30 cm determinaron que las 8 lagunas que conforman el sistema se encuentran afectadas en su capacidad de infiltración por la acumulación de materia orgánica en la superficie, siendo esta una biocolmatación debido a los organismos biológicos que salen del efluente del agua residual tratada, en su mayoría algas microscópicas (Higuera, 2016).

II.8. Infiltración

El tratamiento mediante infiltración se define como la aplicación controlada del agua residual sobre balsas superficiales construidas en suelos de permeabilidad media a alta (con una capacidad de infiltración que oscila entre 10 y 60 cm/día) (Toalongo, 2012).

El agua residual se aplica al terreno en tasas elevadas, bien por extensión en lagunas o bien por aspersión, alternando periodos de inundación con periodos de secado. La aplicación se realiza de forma cíclica para permitir la regeneración aerobia de la zona de infiltración y mantener la máxima capacidad de tratamiento. En cualquier caso se exige un mantenimiento periódico de la superficie de las mismas. El principal inconveniente de este sistema es la tendencia a la colmatación rápida del lecho filtrante por ello el agua residual suele requerir, al menos, un tratamiento primario previo a la aplicación, siendo las cargas hidráulicas anuales normales de 6 a 100 m/año (Moreno, 2003).

II.8.1. Ecuación general para la infiltración

La ecuación general considera flujo de agua en medio no saturado (Ecuación 1). Este tipo de flujo puede describirse con la ecuación de Darcy, originalmente desarrollada para suelos saturados (Tindal, Kunket., 1999):

$$q = K \text{ grad } h [L^2 T^{-1}] \quad (1)$$

Dónde:

q = velocidad de Darcy [$L^2 T^{-1}$]

K = conductividad hidráulica del suelo [LT^{-1}]

h = carga piezométrica [L]

En suelos no saturados K varía con la humedad del suelo, teniendo como límite la conductividad hidráulica saturada K_{sat} . h, por su parte, tiene dos componentes principales en un suelo no saturado, en función de las energías involucradas (ecuación 2):

$$h = \varphi + z [L] \quad (2)$$

Dónde:

φ = potencial capilar, altura de agua equivalente que ejerce la misma tensión de succión capilar [L].

z = potencial gravitacional (profundidad) [L].

La carga piezométrica de agua “h” se mide en dimensiones de altura pero también puede entenderse como la energía por unidad del peso del fluido.

II.9. Regresión

Se define como un procedimiento mediante el cual se trata de determinar si existe o no relación de dependencia entre dos o más variables. Es decir, conociendo los valores de una variable independiente, se trata de estimar los valores, de una o más variables dependientes (Plascencia, 2015)

II.9.1. Regresión simple

Se conoce como regresión simple el cálculo de la ecuación correspondiente a la línea que mejor describe la relación entre la respuesta y la variable que la explica. Dicha ecuación representa la línea que mejor se ajusta a los puntos en un gráfico de dispersión (Astorga, 2014).

En la regresión simple se tiene una única variable predictora (ecuación 3). Algunas veces se tiene interés en dos o más variables regresoras o predictoras. En esos casos, se debe recurrir al uso de regresión múltiple. A partir de la regresión lineal es posible hacer predicciones sobre la respuesta con base en valores de la variable predictora.

La ecuación para una línea recta es:

$$Y = b_0 + b_1 x \quad (3)$$

Dónde:

Y = variable respuesta.

X = variable predictora.

b_0 = intersección, determina el valor de y cuando x es cero.

b_1 = pendiente, determina la cantidad en la que cambia y cuando x se incrementa en una unidad.

Las distancias entre los puntos y la línea de regresión se llaman residuos. Ellos representan la porción de la respuesta que no es explicada por la ecuación de regresión; es decir que la diferencia entre el valor observado y el valor aproximado es el residuo. En cualquier análisis de regresión se observará que algunos puntos están más cerca de la línea y otros mucho más lejos de ella. Entre más cerca se encuentren los puntos a la línea, mejor será el ajuste entre la línea de regresión y el

dato. Los residuos permiten verificar la ecuación con el fin de comprobar cuan bien se ajusta la línea a los datos (Carrasquilla, et al., 2016).

II.9.2. Modelos de regresión lineal múltiple (RLM)

La modelación estadística, con el tiempo y el avance tecnológico, se ha ampliado y en la actualidad se utiliza para resolver problemas en diferentes áreas científicas.

Los modelos de regresión múltiple son la extensión del modelo de regresión simple, siendo unas de las técnicas estadísticas más usadas para analizar datos. El objetivo de los modelos de regresión múltiple es encontrar la relación entre variables (López, López, 2010).

El modelo de regresión lineal múltiple se utiliza cuando

1. La variable dependiente, Y, depende linealmente de cada una de las variables explicativas.
2. Una variable independiente no basta para explicar suficientemente la variabilidad de Y.

Los modelos de regresión simple y múltiple presentan las características ideales para el tratamiento de variables cuantitativas que responden según las variables predictoras o regresoras dentro del fenómeno estudiado.

Algunas veces se puede establecer una relación de tipo lineal entre la variable dependiente (Y) y varias (p) independientes X1, X2..., Xp o regresores, la cual es la generalización o extensión natural de la regresión lineal simple (ecuación 4). Su expresión es (Campos, 2016).

$$y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \dots + \beta_p X_p + \varepsilon \quad (4)$$

Entonces, los principios que rigen la regresión lineal se aplican a la RLM, por ejemplo, que tanto Y como las Xp estén normalmente distribuidas, y que los errores ε sean independientes y tengan distribución normal de media cero y misma varianza (σ^2) para cada X. La solución de mínimos cuadrados de los residuos de forma matricial para el caso general expuesto y con n observaciones o datos de Y, y de los regresores es la siguiente (Campos, 2016):

$$Y = X \cdot \beta + \varepsilon \quad (5)$$

$$Y = \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ Y_3 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ Y_n \end{bmatrix}, X = \begin{bmatrix} 1 & X1_1 & X2_1 & \dots & Xp_1 \\ 1 & X1_2 & X2_2 & \dots & Xp_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & X1_n & X2_n & \dots & Xp_n \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\beta = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \beta_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \beta_p \end{bmatrix}, \varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \dots \end{bmatrix} \quad (7)$$

El planteamiento de esta solución implica que la sumatoria de 1 a n de los residuos al cuadrado debe ser minimizada, es decir que: Y_i

$$\sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (8)$$

$$= \sum_{i=1}^n (y_i - \beta_0 - \beta_1 X1_i - \beta_2 X2_i - \dots - \beta_p Xp_i)^2 \quad (9)$$

Entonces, diferenciando el lado derecho de la ecuación anterior con respecto a β_0 , β_1 , β_2 ,... β_p por separado, se originan las ecuaciones llamadas normales, función de los parámetros desconocidos. En notación matricial, estas ecuaciones son:

$$(X' \cdot X) \cdot \hat{\beta} = X' \cdot Y \quad (10)$$

Cuya solución es:

$$\hat{\beta} = (X' - X)^{-1} \cdot (X' - Y) \quad (11)$$

En la cual X' es la matriz transpuesta de X y $(X' \cdot X)^{-1}$ indica la matriz inversa de $X' \cdot X$

Una extensión natural del modelo de regresión lineal simple consiste en considerar más de una variable explicativa.

CAPITULO III. METODOLOGÍA

Este trabajo se realizó en coordinación con el Organismo Operador Municipal de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento (OOMAPAS) de San Luis Río Colorado, la Universidad Estatal de Sonora (UES) y el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT).

III.1. Ubicación del área de estudio

El estudio se desarrolló en el sistema de recarga artificial de San Luis Río Colorado, ubicado en la porción noroeste del estado de Sonora México; colinda al Norte con el condado de Yuma, Arizona, E.U.A, al Sur con el golfo de California, al Este con el Municipio de Puerto Peñasco, Sonora y al Oeste con el estado de Baja California. Con las siguientes coordenadas: 31° 38' a 32° 29' Latitud N. y 114° 17' a 115° 03' Longitud W (figura 2).

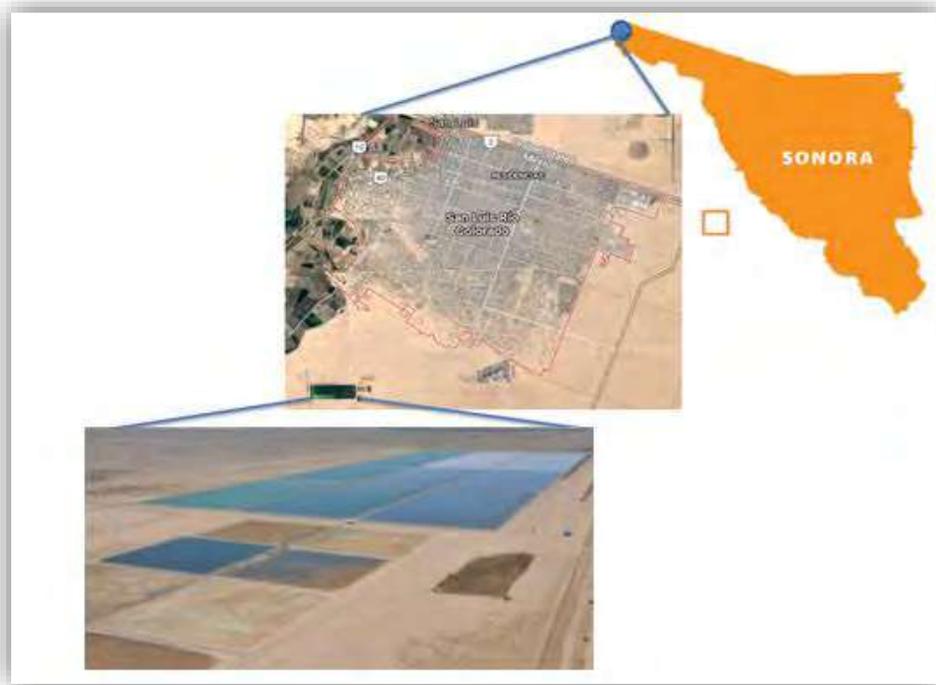


Figura 2. Ubicación del área de estudio, San Luis Río Colorado y la PTAR

III.2. Etapas desarrolladas en el proyecto

El presente estudio se llevó a cabo en la laguna 8 del sistema de recarga, desarrollado en dos etapas determinadas en un análisis de variables directamente relacionadas con el proceso de infiltración, antes y después de la remoción del suelo o capa colmatada, descritas a continuación:

III.2.1. Primera etapa.- Datos preliminares para proceso de remediación:

La primera etapa consistió en determinar las variables de materia orgánica, densidad real, densidad aparente, porosidad e infiltración del suelo de la laguna en estudio, posteriormente en la variable de materia orgánica se tomó un testigo de comparación del suelo no alterado de la PTAR para su interpretación.

III.2.2. Segunda etapa.- Evaluación del proceso de remediación:

La segunda etapa consistió en remover los primeros 25 cm de suelo de la laguna en estudio para analizar su recuperación mediante el análisis comparativo de las variables de materia orgánica, densidad real, densidad aparente, porosidad e infiltración respecto a la primera etapa.

III.3. Determinación de parámetros

III.3.1. Materia orgánica

La determinación de materia orgánica se realizó en 15 puntos representativos (Figura 3) a una profundidad de 25 cm, con toma de muestras cada 5 cm.

Las muestras se llevaron a laboratorio para quitar la humedad del suelo, donde se metieron a la mufla durante 24 horas, a una temperatura de $110^{\circ} \pm 5^{\circ} \text{C}$. Transcurrido dicho tiempo, se determinó el peso del recipiente con la muestra seca, para posteriormente determinar el porcentaje de materia orgánica por el método de calcinación, (Nelson y Sommers, 1996).

Para su determinación cada muestra se pesó en un crisol con peso conocido y se introdujeron a la mufla por 7 horas a una temperatura de 374°C , para posteriormente sacar la muestra y pesarla, determinando por diferencia de pesos el porcentaje de materia orgánica con la siguiente fórmula

$$\% MO = \frac{(P1 - P2)}{(P2 - C)} * 100 \quad (12)$$

Dónde:

MO = Materia orgánica

P1 = Peso del suelo antes de calcinación

P2 = Peso del suelo después de calcinación

C = Recipiente

Para su interpretación, manejo y presentación de datos se utilizaron los software ARCGIS V10, SIGMAPLOT Y EXCEL.



Figura 3. Selección de puntos de pruebas de infiltración en la laguna ocho.

III.3.2. Densidad real

La densidad real se realizó en el Instituto de Ciencias Agrícolas de la Universidad Autónoma de Baja California a partir de una muestra compuesta de los puntos 1, 2, 3, 7, 8, 9, 13, 14 y 15 (figura 3) utilizando el método del picnómetro (Klute, 1986).

III.3.3. Densidad aparente

La densidad aparente se realizó en los mismos puntos que la densidad real (figura 3) a una profundidad de 10 cm por el método del cilindro desarrollado por Blake y Hartge, 1986; citado por Agostini et al, (2014)

III.3.4. Porosidad

La porosidad del suelo se calculó en función de la densidad real y densidad aparente obtenidas de los apartados III.3.2. y III.3.3. utilizando la siguiente fórmula:

$$P (\%) = \frac{D_r - D_{ap}}{D_r} \times 100 \quad (13)$$

Dónde:

P = Porosidad

Dr = Densidad real

Dap= Densidad aparente

III.3.5. Infiltración

Se determinó la infiltración del suelo de la laguna en estudio utilizando el método original de doble anillo desarrollado por Murgrave (1935) y citado por De la Peña (1987), consistiendo en saturar una porción de suelo limitada por dos anillos concéntricos (figura 4) midiendo la variación del nivel del agua en el cilindro interior. Para su determinación se seleccionaron los puntos 2, 7, 8, 9 y 14 de la laguna (figura 3).



Figura 4. Infiltrómetro doble anillo.

III.3.6. Modelo de colmatación

La realización del modelo de colmatación se desarrolló de acuerdo a los resultados obtenidos de las variables analizadas del apartado III.2.1 durante la primera etapa debido a que se buscaba determinar una ecuación con valores reales de un suelo colmatado.

Se utilizó un modelo de regresión lineal múltiple, con el fin de obtener una ecuación predictora del fenómeno de colmatación, donde se analizó la correlación de las variables.

Para el desarrollo del modelo se descartaron las variables de densidad real y porosidad debido a que las dos van en función de la densidad aparente y el programa las descarto.

Como variable dependiente (Y), se utilizó infiltración (INF) debido a su relación directa con el fenómeno de colmatación, Las variables independientes fueron materia orgánica (MO) y densidad aparente (DA).

Para su interpretación y modelación se utilizó el software de Minitab 2017.

CAPITULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

IV.1. Materia orgánica

IV.1.1. Análisis Comparativo de materia orgánica de la 1era etapa y testigo

De acuerdo a los resultados del análisis comparativo de materia orgánica (MO) de la primera etapa, se observaron altos contenidos de materia orgánica en base al testigo, como se observa en la figura 5, todas las muestras analizadas de materia orgánica de la laguna fueron más altas que el testigo, en los primeros 5 cm se obtuvo un porcentaje de 1.96 de MO en la laguna, mientras que para el testigo a esa profundidad se encontró un porcentaje de 0.24, teniendo una diferencia significativa de 1.72% de acuerdo, a los valores iniciales de la planta para la laguna, así mismo, para las demás profundidades analizadas (10, 15, 20 y 25 cm) se obtuvieron porcentajes de 0.89, 0.82, 0.61 y 0.28% respectivamente. Determinado de esta manera y basado en resultados anteriores (Higuera, 2016) se define que los primeros 25 cm de la laguna se encuentran altamente afectados por el fenómeno de colmatación.

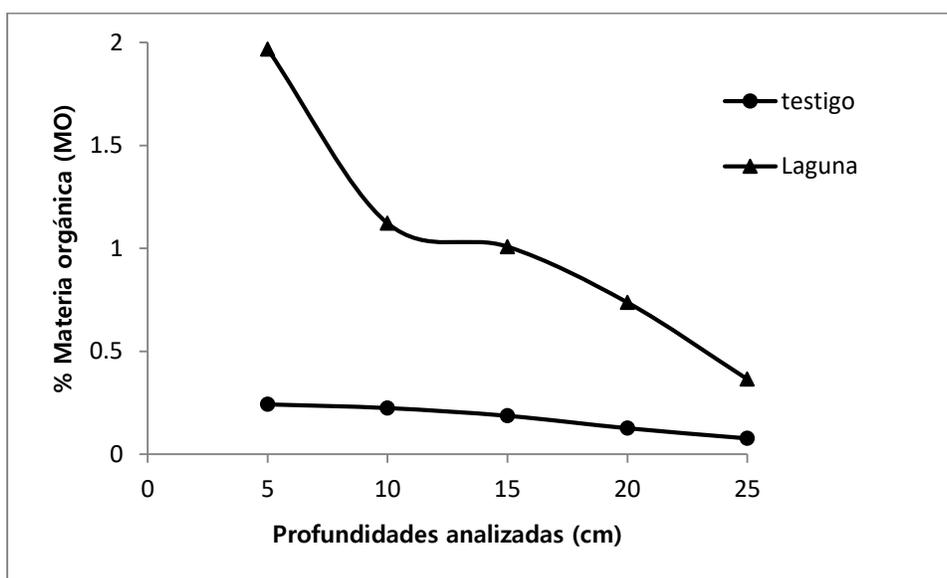


Figura 5. Comparativo del contenido de materia orgánica del testigo y laguna ocho.

IV.1.2. Interpolación de resultados de materia orgánica (etapa 1), software Arcgis

De acuerdo a los resultados de materia orgánica obtenidos en la primera etapa, se realizó la interpolación con el software Arcgis, para obtener la distribución espacial del comportamiento de materia orgánica. Como se puede observar en la figura 6, se distribuye de manera muy uniforme los porcentajes más altos de materia orgánica, así mismo, en la parte Norte, Sur y este de la laguna se concentran de forma puntual los valores más bajos, sin embargo los porcentajes más altos cubren toda la laguna, en la parte oeste se concentran los valores más altos debido a un desnivel que se encontraba en la laguna, por lo que fue necesario hacer el levantamiento de los 25 cm de la laguna para evitar el fenómeno de colmatación siga afectando la infiltración.

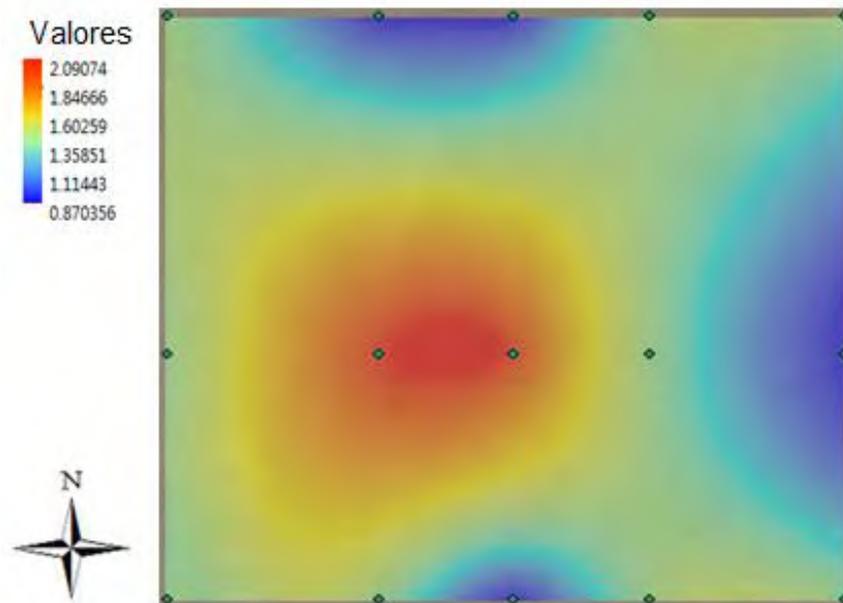


Figura 6. Distribución espacial del porcentaje de materia orgánica (primera etapa)

IV.1.3. Análisis comparativo de materia orgánica después de la remoción de 25 cm de suelo (segunda etapa).

De acuerdo a los resultados de la segunda etapa en los primeros 5 cm se obtuvo un porcentaje de 0.33 y disminuyendo a 0.23% a los 10 cm, comparando estos resultados con la etapa 1 podemos observar una disminución de MO a los 5 y 10 cm de 1.63% y 0.89% respectivamente.

Como se observa en la figura 7 podemos afirmar que hubo una disminución del porcentaje de materia orgánica mejorando la calidad del suelo de la laguna obteniendo valores muy similares entre la etapa 2 y el testigo.

Los resultados de la segunda etapa para los 5 y 10 cm fueron del orden 0.33 y 0.23% respectivamente mientras que para el testigo en los 5 y 10 cm fueron del orden de 0.24 y 0.22% con una mínima diferencia de 0.09% para los primeros 5 cm y 0.01 para los 10 cm.

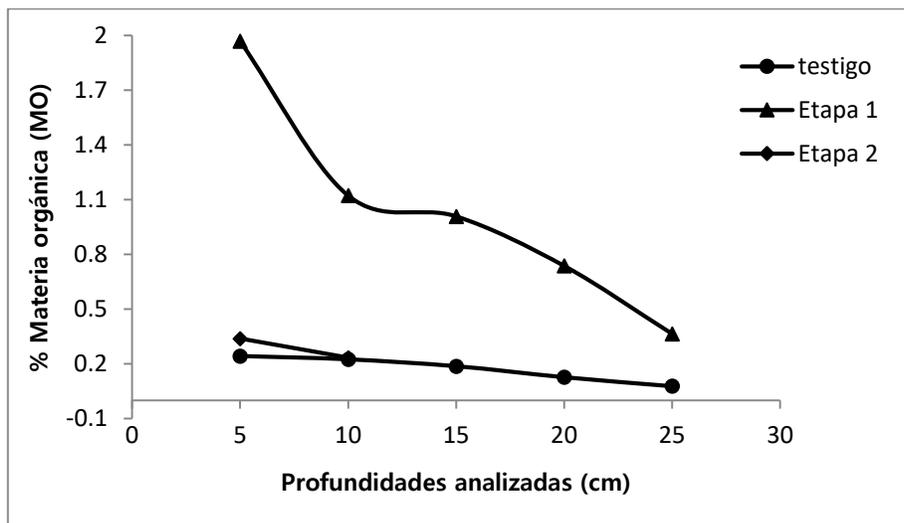


Figura 7. Porcentaje de materia orgánica después de la remoción de los 25 cm de suelo

IV.2. Análisis comparativo de las propiedades físicas del suelo del sistema de recarga

Los resultados del análisis comparativo (tabla 2) nos indican que hubo una disminución de densidad real y densidad aparente del suelo, de acuerdo a la primera etapa, se observaron valores de 1.9 (densidad real) y 1.56 g/cm³ (densidad aparente), posteriormente de la remoción de la capa colmatada (denominada etapa dos) se observó una disminución de 0.09 y 0.15 g/cm³ respectivamente. Como consecuencia de estos resultados la variable de porosidad aumentando 3.74 por ciento, lo que favorece considerablemente al sistema de recarga debido a que una mayor porosidad en el suelo del sistema permite una mejor infiltración del agua.

Tabla 2. Propiedades físicas del suelo

| Propiedades físicas del suelo | Primera etapa | Segunda etapa | Diferencia |
|--|---------------|---------------|------------|
| Densidad Real (g/cm ³) | 1.9 | 1.81 | 0.09 |
| Densidad aparente (g/cm ³) | 1.56 | 1.41 | 0.15 |
| Porosidad (%) | 17.89 | 21.54 | -3.65 |

IV.3. Análisis comparativo de las pruebas de infiltración

IV.3.1. Punto de muestreo 2

En la figura 8 se observan los resultados del punto 2, la infiltración en la primera etapa fluctuó entre 4.5 y 6,3 m/d, para la segunda etapa se observó una recuperación de infiltración que fluctuó entre 5 y 7 m/d en un tiempo de 20 a 120 min. Los valores de correlación encontrados en las infiltraciones fueron del orden de 0.9816 y 0.9911 antes y después de la remoción de la capa colmatada. Reflejándose una recuperación en la segunda etapa, para este punto del 0.7 hasta 0.5 m/d. porcentajes

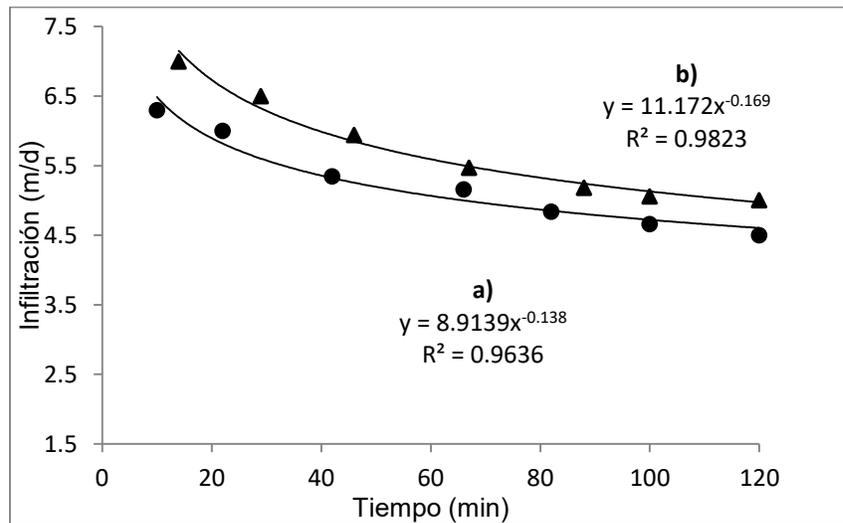


Figura 8. Pruebas de infiltración en el punto dos: a) antes (primera etapa) y b) después (segunda etapa) de la remoción de la capa colmatada.

IV.3.2. Punto de muestreo 7

De acuerdo a los resultados del punto 7 (figura 9), se observa valores de infiltración, entre 4 a 5.1 m/d antes de la remoción de la capa de suelo (denominada 1er etapa), posterior a la remoción de 25 cm de suelo se observó una recuperación oscilando entre 4.4 a 6.6 m/d en un tiempo de 20 a 120 min. Los valores de correlación encontrados en las infiltraciones antes y después de la remoción de la capa colmatada fueron del orden 0.9825 y 0.9870. Donde se puede observar que en los primeros 40 min se muestra una diferencia significativa, donde podemos decir que es el tiempo afectado por el fenómeno de colmatación.

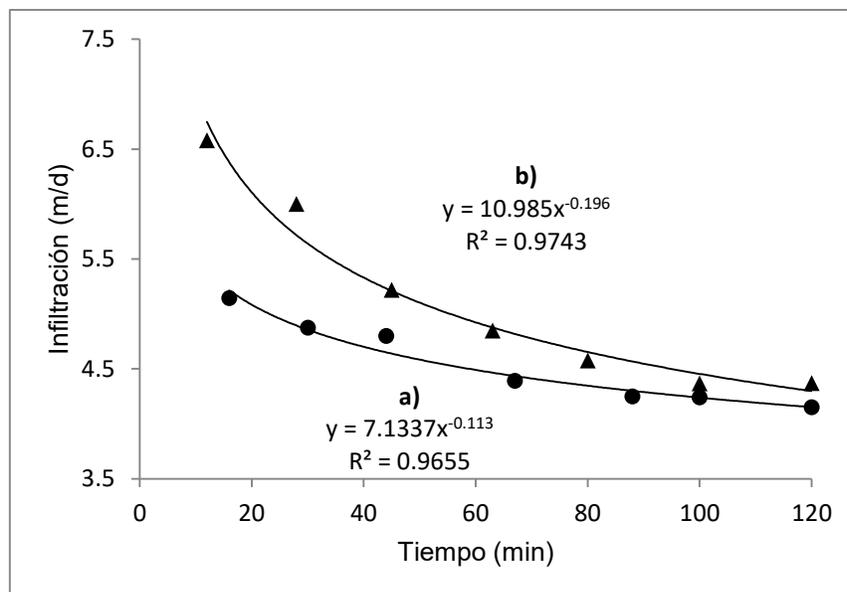


Figura 9. Pruebas de infiltración en el punto siete: a) antes (primer etapa) y b) después (segunda etapa) de la remoción de la capa colmatada.

IV.3.3. Punto de muestreo 8

De acuerdo a los resultados del punto 8 (figura 10), se observan infiltraciones que fluctúan entre 2.5 y 3.6 m/d antes de la remoción de la capa colmatada (denominada 1er etapa), posteriormente se observó una recuperación en la segunda etapa con valores de infiltración que fluctúan entre 3.5 y 6.5 m/d. Los resultados de correlación de la primera y segunda etapa fueron del orden 0.9875 y 0.9910.

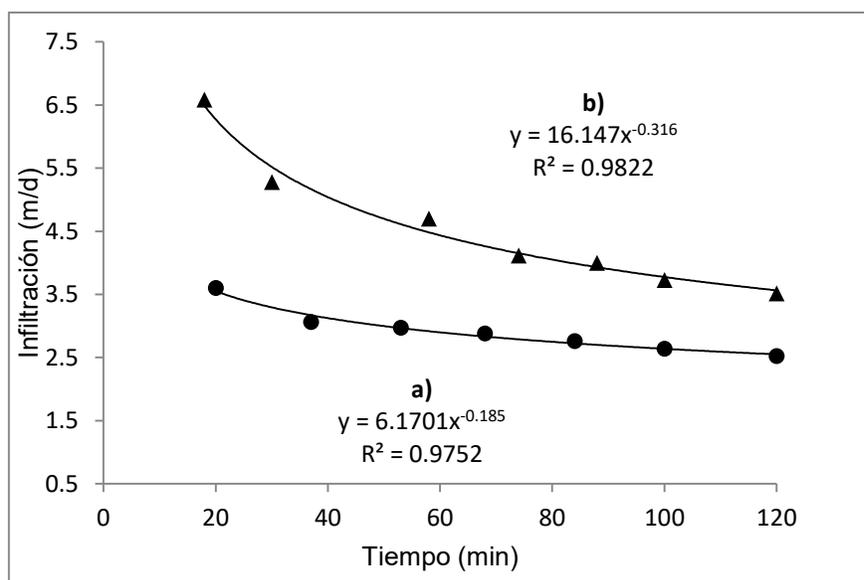


Figura 10. Pruebas de infiltración en el punto ocho: a) antes (primer etapa) y b) después (segunda etapa) de la remoción de la capa colmatada.

IV.3.4. Punto de muestreo 9

Los resultados del punto 9 (figura 11), de acuerdo a las pruebas de infiltración de la primera etapa oscilan entre 4.7 y 5.6 m/d, por otra parte, los resultados de infiltración de la segunda etapa oscilan entre 4.9 y 7 m/d. Los valores de correlación de la infiltración antes y después de la remoción de la capa colmatada fueron del orden de 0.9904 y 0.9832.

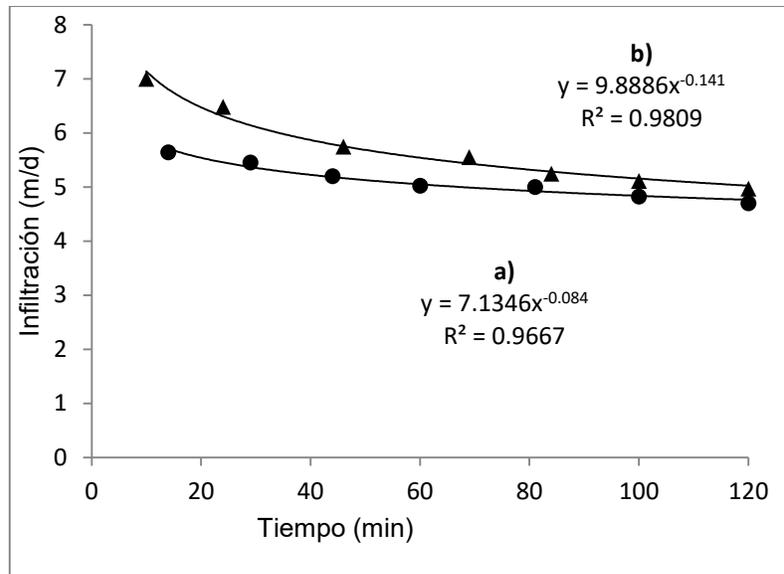


Figura 11. Pruebas de infiltración en el punto nueve: a) antes (primer etapa) y b) después (segunda etapa) de la remoción de la capa colmatada.

IV.3.5. Punto de muestreo 14

En la figura 12 se observan los resultados del punto 14, la infiltración fluctúa entre 2.7 y 3.4 m/d en la primera etapa, posteriormente en la segunda etapa se observó una recuperación de infiltración que fluctúa entre 3.8 y 5.5 m/d en un tiempo de 20 a 120 min. Los valores de correlación encontrados en las infiltraciones fueron del orden de 0.9803 y 0.9830 antes y después de la remoción de la capa colmatada.

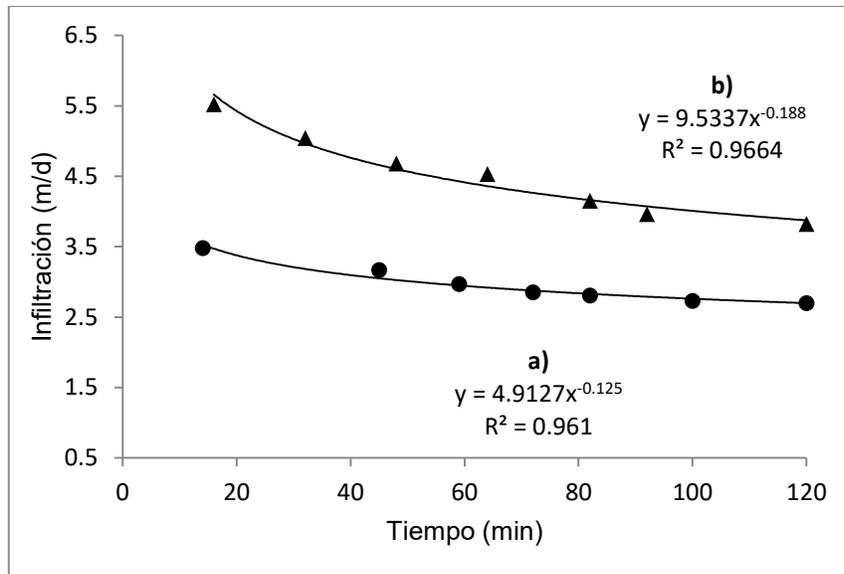


Figura 12. Pruebas de infiltración en el punto 14: a) antes (primer etapa) y b) después (segunda etapa) de la remoción de la capa colmatada.

IV.3.6. Análisis conjunto entre los puntos de infiltración

Analizando las comparaciones conjuntas entre los 5 puntos de muestreo se encontró que para las gráficas 8 y 11 correspondientes a los puntos de muestreo 2 y 9 se presentó una infiltración inicial muy similar antes y después de la remoción de la capa colmatada; en lo que respecta a las gráficas 9, 10 y 12 de los puntos 7, 8 y 14, se tiene una mejora significativa en los valores de infiltración al inicio de estas pruebas (20 min). Las observaciones antes descritas se debieron fundamentalmente a la topografía del terreno de estudio, observándose que para el primer caso se situaron en partes altas de la laguna, respecto al segundo caso se ubicaron en sitios bajos (figura 6) que provocaban un estancamiento y por consiguiente una remarcada colmatación los puntos de muestreo.

IV.4. Modelo de colmatación

El modelo propuesto (apartado III.3.6.) fue aplicado y se determinó la ecuación de la regresión (ecuación 14), la cual obtiene el valor de infiltración en las lagunas a partir de densidad aparente y materia orgánica, donde su utilidad técnica se enfoca al pronóstico de la infiltración del sistema de recarga.

$$INF = - 3.75 + 5.940 DA - 1.58 MO \quad (14)$$

En el análisis de la varianza se pudo afirmar que existe una relación lineal múltiple entre las variables de materia orgánica (MO) densidad aparente (DA) e infiltración (INF), con un grado de confianza del 99 %, la información es altamente confiable.

De acuerdo a los resultados de la ecuación se elaboró la tabla 3, donde se muestran las variables de entrada: materia orgánica, densidad aparente e infiltración, y a partir del cual será posible contar con un pronóstico del estado en que se encuentra la laguna respecto al fenómeno de colmatación.

Tabla 3. Pronóstico de variables de acuerdo al grado de colmatación

| Materia Orgánica (%) | Densidad Aparente (g/cm³) | Infiltración (m/d) |
|-----------------------------|---|---------------------------|
| 0.05 | 1.579 | 5.552 |
| 0.10 | 1.578 | 5.467 |
| 0.15 | 1.577 | 5.384 |
| 0.20 | 1.576 | 5.300 |
| 0.25 | 1.576 | 5.217 |
| 0.30 | 1.575 | 5.133 |
| 0.35 | 1.574 | 5.049 |
| 0.40 | 1.573 | 4.966 |
| 0.45 | 1.572 | 4.882 |
| 0.50 | 1.572 | 4.798 |
| 0.55 | 1.571 | 4.715 |
| 0.60 | 1.570 | 4.631 |
| 0.65 | 1.569 | 4.547 |
| 0.70 | 1.569 | 4.464 |
| 0.75 | 1.568 | 4.380 |
| 0.80 | 1.567 | 4.297 |
| 0.85 | 1.566 | 4.213 |
| 0.90 | 1.565 | 4.129 |
| 0.95 | 1.565 | 4,046 |
| 1.00 | 1.564 | 3.962 |

| Materia Orgánica (%) | Densidad Aparente (g/cm³) | Infiltración (m/d) |
|-----------------------------|---|---------------------------|
| 1.05 | 1.563 | 3.878 |
| 1.10 | 1.562 | 3.795 |
| 1.15 | 1.562 | 3.711 |
| 1.20 | 1.561 | 3.628 |
| 1.25 | 1.560 | 3.544 |
| 1.30 | 1.559 | 3.460 |
| 1.35 | 1.558 | 3.377 |
| 1.40 | 1.558 | 3.293 |
| 1.45 | 1.557 | 3.209 |
| 1.50 | 1.556 | 3.126 |
| 1.55 | 1.555 | 3.042 |
| 1.60 | 1.555 | 2.958 |
| 1.65 | 1.554 | 2.875 |
| 1.70 | 1.553 | 2.791 |
| 1.75 | 1.55 | 2.708 |
| 1.80 | 1.551 | 2.624 |
| 1.85 | 1.551 | 2.540 |
| 1.90 | 1.550 | 2.457 |
| 1.95 | 1.549 | 2.373 |
| 2.00 | 1.548 | 2.289 |

CAPITULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El grado de colmatación encontrado al inicio del estudio durante la primera etapa observó valores siete veces superiores con respecto al comparativo del testigo.

Durante la primera etapa se presentó una mayor acumulación de materia orgánica en los primeros diez centímetros de profundidad, oscilando entre 1.12 y 1.96%. Posterior a la remoción de la capa colmatada, correspondiente a los 25 cm superficiales de suelo (etapa dos), los niveles de materia orgánica mostraron una disminución en el orden de 0.23 y 0.33%.

Los valores de densidad real y aparente del suelo durante la primera etapa mostraron una diferencia respecto a la segunda etapa de 0.09 y 0.15 g/cm³ respectivamente, recuperando el porcentaje de porosidad que se tenía al inicio del estudio de 17.89% a 21.54% posterior a la remoción de la capa colmatada, favoreciendo al sistema, a mayor porosidad una mejor infiltración.

Las pruebas de infiltración desarrolladas en los cinco puntos de muestreo durante la primera etapa mostraron una infiltración estacionaria de 2.5 hasta 4.7 m/d, de acuerdo a los resultados se presentaron desniveles topográficos con puntos bajos donde se incrementaban los porcentajes de MO y disminuía la infiltración. Recuperándose después de la remoción de la capa colmatada con valores que oscilaron entre 3.5 y 5 m/d.

De acuerdo a modelo propuesto de regresión lineal múltiple, se obtuvo la ecuación de la infiltración, con la cual se elaboró una tabla con las variables de materia orgánica, densidad aparente e infiltración que servirá a OOMAPAS como pronóstico del estado de la laguna.

CAPITULO VI. BIBLIOGRAFIA

- Agostini M. A., Monterubbianesi M. G., Studdert G. A. & Maurette S., (2014). Un método simple y práctico para la determinación de densidad aparente. Ciencia del suelo.
- Astorga G. J. M., (2014). Aplicación de modelos de regresión lineal para determinar las armónicas de tensión y corriente Ingeniería Energética, vol. XXXV, núm. 3, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría La Habana, Cuba. ISSN: 1815-5901.
- Campos A. D. F., (2016). Una aplicación hidrológica de la regresión lineal múltiple ponderada Tecnología y Ciencias del Agua, vol. VII, núm. 4. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua Morelos, México. ISSN 0187-8336.
- Campos S. M., (2011). Proyecto: desarrollo de capacidades en el uso seguro de aguas residuales para agricultura. Ministerio de agricultura y desarrollo rural. República de Colombia. Reporte nacional.
- Campuzano Ch. R., (2015) Estudio de colmatación por materia orgánica en lagunas de infiltración. Informe de trabajo. Organismo Operador Municipal de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento (OOMAPAS).
- Carrasquilla B. A., Chacón R. A., Núñez M. K., Gómez E. O., Valverde J. & Guerrero B. M., (2016). Regresión lineal simple y múltiple: aplicación en la predicción de variables naturales relacionadas con el crecimiento microalga. Tecnología en Marcha. Encuentro de Investigación y Extensión 2016.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). (2007). Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento: desinfección para sistemas de agua potable y saneamiento, recuperado de: [ftp://ftp.conagua.gob.mx/Mapas/libros_pdf_2007/Desinfecci%F3n para Sistemas de Agua Potable y Saneamiento.pdf](ftp://ftp.conagua.gob.mx/Mapas/libros_pdf_2007/Desinfecci%F3n_para_Sistemas_de_Agua_Potable_y_Saneamiento.pdf)
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua) (2010). Determinación De La Disponibilidad De Agua En El Acuífero 2601 Valle De San Luis Río Colorado, Estado De Sonora.

CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). (2014). Visita de Mekorot a la zona del acuífero valle Mexicali.

CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). (2016a). Estadísticas de agua en México. Edición 2016.

CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). (2016b). La CONAGUA fortalece la estrategia de recarga de acuíferos.

De la Peña I., (1987). Manual del uso y manejo del agua de riego. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos.

De la Peña M. E., Ducci J. & Zamora V., (2013). Tratamiento de aguas residuales en México. Banco Interamericano de desarrollo. Sector de Infra-estructura y Medio ambiente.

Díaz J. M. M., Gómez J. A., Cachero J. L. A., & Castaño S. C., (2000). Recarga Artificial de Acuíferos: Conceptos Generales. Recuperado de: http://aguas.igme.es/igme/publica/libro36/pdf/lib36/in_01b.pdf.

Fernández E. E. A., (2003). La recarga artificial de acuíferos en el mundo. Estado de la cuestión y experiencias.

Fernández E. E. A., (2005). Recarga artificial de acuíferos en cuencas fluviales. Aspectos cualitativos y medioambientales. Criterios técnicos derivados de la experiencia en la Cubeta de Santiuste (Segovia).

Fernández E. E. A., Minaya O. M^a. J., & Senent del Álamo M. W., (2010) Inventario de tipologías de dispositivos de gestión de la recarga a nivel internacional. Aportaciones al estado del arte y nuevas propuestas. Coord. Fernández Escalante. La gestión de la recarga artificial de acuíferos en el marco del desarrollo sostenible desarrollo tecnológico. Serie Hidrogeología Hoy. Madrid España.

García F. M. & Maza A. J. A., (1985). Manual de Ingeniería de ríos. Cap. 10: Transporte de sedimentos. México: UNAM.

- Higuera L. L. C., (2016). Estudio de colmatación de suelo en lagunas de infiltración de la planta de tratamiento de aguas residuales de san luís río colorado, sonora (tesis de pregrado). Universidad Estatal de Sonora.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2015). Censos y conteos de población y vivienda.
- Klute A., (1986) Methods of soil analysis Part I. Physical and mineralogical methods. Agronomy No. 9. 2nd ed.
- López G. J. A., De la Orden J. A., Fernández R. L., Martínez N. C. & Murillo, J.M., (2004). Investigaciones en sistemas Kársticos españoles. Instituto Geológico y Minero de España. Hidrología y Aguas Subterráneas N° 12.
- López O. H. A. & López O. R. D., (2010). Modelos de optimización por metas para el cálculo de estimadores en regresión múltiple. Ciencia e Ingeniería Neogranadina, vol. 20, núm. 1, junio, 2010, Universidad Militar Nueva Granada Bogotá, Colombia. ISSN: 0124-8170
- Mendoza A. E., (2012). Caracterización hidrogeológica de la porción sureste de la planicie de Texcoco, México, para establecer sitios de recarga artificial al acuífero (tesis de pregrado). Universidad Nacional Autónoma de México.
- Moreno M. L., (2003) La depuración de aguas residuales urbanas de pequeñas poblaciones mediante infiltración directa en el terreno. Fundamentos y casos prácticos. Serie Hidrogeología y aguas subterráneas. Instituto Geológico y Minero de España
- Murillo D. J. M., Orden G. J. A., Amayor C. J. L. & Castaño C. S., (2000). Recarga artificial de acuíferos. Síntesis metodológica. Estudios y actuaciones realizadas en la provincia de alicante. Instituto Geológico y Minero de España.
- Nelson D. W. & Sommers L. E., (1996). Total carbon, organic carbon, and organic matter. In: Methods of soil Analysis, Part 2, 2nd ed., A.L. Agronomy. Inc. Madisoon, W.L.
- Parra P. I. & Chiang R, G., (2013). Modelo integrado de un sistema de biodepuración en origen de aguas residuales domiciliarias. Una propuesta para comunidades

periurbanas del centro sur de Chile. Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal.

Plascencia V. A. C., (2015). Análisis de regresión múltiple del fenómeno de la trata de personas en México. Tesis para grado de maestría. Recuperado de: <http://148.204.210.201/tesis/1457542786408TesisAdrianaP.pdf>

Rodríguez V. D., (2013). Análisis de la técnica de recarga artificial en la cubeta de Sant Andreu de la Barca (Barcelona). Tesis de pregrado. Departamento de ingeniería geológica.

Silva J., Torres P., & Madera C., (2008). Reúso de aguas residuales domésticas en agricultura. Una revisión. *Agronomía Colombiana*, 26(2), 347-359. Recuperado de: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-99652008000200020&lng=en&tlng=es.

Soriano M. C., (2009) Caracterización de la materia particulada de La línea de aguas residuales de un sistema de Humedales construidos. Tesis. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Universidad Politécnica de Catalunya. Barcelona.

Tindall A. J. & Kunkel J. R., (1999). *Unsaturated Zone Hydrology for Scientists and Engineers*. Prentice-Hall, Inc.

Toalongo R. E. D., (2012). Diseño de un sistema de recolección, depuración y aprovechamiento de aguas residuales para fincas agroecológicas familiares en la parroquia El Valle Cantón Cuenca. Universidad de Cuenca.

USGS (United States Geological Survey). (2009). U.S. Department of the Interior. *Investigations Report*.

Valcarce O. R. M., González M. Y. & Díaz G. M., (2018). Contribución de la Geofísica para ubicar pozos de recarga artificial: subcuenca Jaruco. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*.

CAPITULO VII. ANEXO FOTOGRÁFICO



Anexo 1. Pruebas de infiltración con agua residual tratada, después de la remoción de los 25 cm



Anexo 2. Tamizando muestras



Anexo 3. Muestras en mufla para determinar porcentaje de materia orgánica



Anexo 4. Toma de infiltraciones



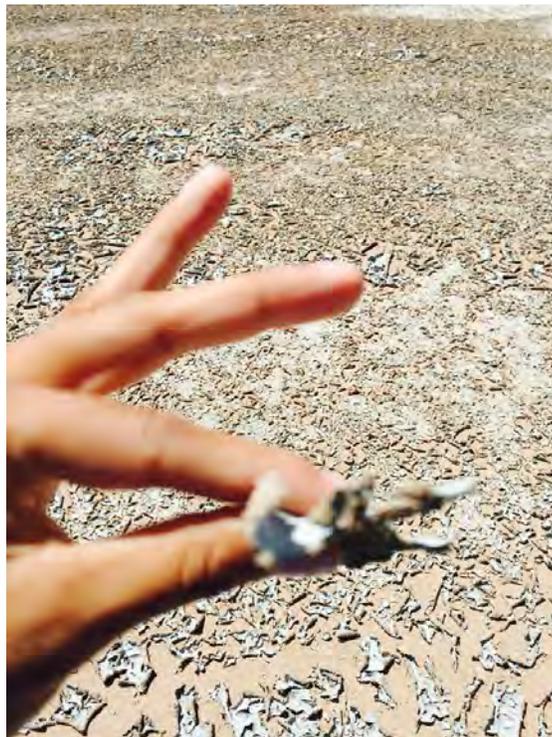
Anexo 5. Capa gruesa con suelo colmatado



Anexo 6. Laguna con el fenómeno de colmatación



Anexo 7. Laguna sin el fenómeno de colmatación



Anexo 8. Capa delgada después de la remoción