



Cuaderno de Investigación

**Colección
Ciencias
Básicas**

**Implementación de un
diseño piloto de bandejas
de aireación para aguas,
potencializado con
microorganismos
eficientes**

Autores

*Rodrigo Fabián Calderón Muñoz
Sandra del Pilar Forero Pineda*



Catalogación en la fuente: Biblioteca Universidad EAN

Calderón Muñoz, Rodrigo Fabián
Implementación de un diseño piloto de bandejas de
aireación para aguas, potencializado con microor-
ganismos eficientes [Recurso electrónico] / Rodrigo
Fabián Calderón Muñoz, Sandra del Pilar Forero
Pineda. --Bogotá : Universidad EAN, 2013.--
(Ciencias Básicas)

ISBN: 978-958-756-209-5

1. Innovaciones tecnológicas 2. Tecnología.
3. Biología aplicada 4. Química aplicada.
5. Aireación del agua.
I. Forero Pineda, Sandra del Pilar.

628.165 CDD 21



Edición

Dirección Gestión del Conocimiento

Diagramación

Adriana Milena Rodríguez

© Universidad EAN, Carrera 11 No. 78-47 Bogotá D.C., Colombia, 2013.

Prohibida la reproducción parcial o total de esta obra sin autorización de la Universidad EAN.

ISBN: 978-958-756-209-5

Primera edición 2013.

TABLA DE CONTENIDO

Introducción	5
Planteamiento del problema	7
Objetivos	9
1. Marco Teórico	10
1.1 Clasificación convencional de tratamientos para aguas.....	10
1.2 Alternativas para el tratamiento de aguas <i>In Situ</i>	11
1.3 Microorganismos eficientes	17
2. Metodología	19
2.1 Diseño del prototipo	19
2.2 Crecimiento de ME en el laboratorio	21
2.3 Preenriquecimiento de ME	21
2.4 Enriquecimiento de ME	22
2.5 Recuento en placa de ME	22
2.6 Ensayos	23
2.7 Prueba microbiológica final	24
2.8 Desinfección	24
3. Resultados y discusión	25
3.1 Prototipo para agua potable	25
3.2 Prototipo para agua residual doméstica	30
3.3 Diseño general del prototipo en un equipo de filtración	39
3.4 Protocolo académico para la enseñanza del proceso de filtración	41
4. Aportes	46
Conclusiones	47
Bibliografía	49

INTRODUCCIÓN

En este estudio se propone la construcción e implementación de las mejores combinaciones de los parámetros de diseño de las bandejas de aireación y el metabolismo microbiano, el cual es efectivo cuando entra en contacto con materia orgánica y secreta sustancias beneficiosas como vitaminas, ácidos orgánicos, minerales y, fundamentalmente, sustancias antioxidantes mejorando la calidad organoléptica del agua. Por lo general, el sistema de bandejas es utilizado para el tratamiento final de agua potable; en este caso se está evidenciando el metabolismo microbiano como una alternativa para el tratamiento de aguas domésticas. Esto ha llevado a determinar la densidad poblacional de microorganismos aerobios por medio de preenriquecimientos y enriquecimientos, curvas de crecimiento bacteriano y, posiblemente al final, identificaciones bioquímicas, las cuales son capaces de metabolizar la contaminación doméstica de estas aguas.

El prototipo en agua potable funciona a la perfección ya que cumple con las características que se requieren para medir tipo de aguas. El problema radica en la incorporación del inóculo de microorganismos eficientes en las bandejas para que actúen como un consorcio metabólico utilizando el oxígeno como fuente de energía y, de esta manera, eliminando, por lo menos, los malos olores y aclarando el agua. Se esperaría que el material amortiguador de las bandejas, como el coque, sirva como inmovilizador de estos consorcios microbianos y que nos ayude a concluir que el mantenimiento del prototipo se hace simultáneamente de forma física y biológica, es decir, en el momento que se lave el material amortiguador de las bandejas; así mismo, se inocula otro consorcio de microorganismos eficientes. Al parecer, la cantidad de microorganismos que podemos adicionar en este prototipo es de 10 mL para alcanzar a crear una biopelícula en la superficie del agua. Este procedimiento se evaluó y se identificó metabólicamente, y se obtuvo un 55% de efectividad en el tratamiento de purificación del agua, reflejado en los análisis de DBO y DQO, respectivamente.

Este método innovador podría trabajarse cuando hay escasez de agua, en muchas zonas que requieren del uso de agua potable con alta calidad o especialmente en aguas residuales, previamente tratadas, para riego de cultivos o para áreas verdes, ya que al conservar sus nutrientes, se beneficiarían los suelos y, por lo tanto, el agricultor ahorraría en fertilizantes, y la producción se incrementaría en un 10% a diferencia de los cultivos regados con agua natural; esto, gracias a la participación de los microorganismos que metabólicamente pueden recuperar los procesos biogeoquímicos para generar productividad ambiental.

La ejecución de proyectos como este, también ayuda al país a sobrellevar, en el ámbito investigativo, lo concerniente al uso de aguas residuales para riego avanzado, con el fin de establecer los límites máximos permisibles para el tratamiento de aguas servidas domésticas o municipales; sin embargo, habría que esperar la ejecución de estudios para estandarizar el proceso de los límites máximos permisibles para el reuso de aguas residuales en sus diferentes formas: acuicultura, agricultura, urbanista, entre otras.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la mayoría de áreas urbanas y rurales, el agua se trata en las instalaciones de tratamiento de agua antes de distribuirla a los consumidores. Este método de tratamiento se conoce como tratamiento en la fuente porque los contaminantes se eliminan en estas instalaciones antes de que se distribuya el agua. Si el agua no se trata antes de que se le dé un uso en específico, esta deberá ser tratada en el punto de uso para asegurar que su calidad no causará enfermedades. Un método tradicional de tratamiento del agua, ampliamente utilizado en todo el mundo, consiste en hervirla para eliminar los contaminantes. El agua que se hierve plenamente durante al menos uno a tres minutos (un poco más en áreas montañosas) elimina la mayoría de patógenos.

Sin embargo, cabe mencionar la siguiente precaución. El hervir el agua usualmente no es eficaz para la eliminación de contaminantes químicos. De hecho, la ebullición, por lo general, aumenta levemente la concentración de los mismos. El agua hervida corre, además, el riesgo de recontaminación durante el proceso de enfriamiento si no se la protege y almacena debidamente. De otra parte, para hervirla, se requiere de una cantidad significativa de combustible, lo cual puede representar una carga financiera y ambiental.

A pesar de estas limitaciones, la ebullición es aún un tratamiento estándar cuando algún patógeno es objeto de preocupación. En las últimas décadas, las agencias gubernamentales, organizaciones no gubernamentales y el sector privado han desarrollado nuevos e innovadores tratamientos de agua de uso doméstico para llevar soluciones sencillas de bajo costo y fáciles de usar a personas que deben dar tratamiento al agua en sus hogares.

Algunos de los sistemas domésticos utilizados más frecuentemente para el tratamiento de agua en los países en vías de desarrollo son

la cloración, la filtración, la desinfección solar, la filtración/cloración combinadas y la floculación cloración/combinadas.

Uno de los inconvenientes del agua cruda es la poca presencia de oxígeno disuelto: esto se debe a que no hay un contacto íntimo con los gases provenientes de la atmósfera, especialmente el oxígeno, que es de gran utilidad para la mejora del sabor y del olor y de la oxidación del hierro, manganeso, sulfuro de hidrógeno y, hasta cierto punto, de materia orgánica, que metabólicamente ayudan a los procesos de oxido-reducción. La ausencia de oxígeno disuelto (OD) en el agua es un indicador de mala calidad.

Por otra parte, la presencia de Dióxido de Carbono (CO_2) en el agua, ocasiona una acción corrosiva de esta en tuberías y reacciona con los productos químicos empleados en el tratamiento de ablandamiento y en los procesos de separación del hierro y el sulfuro de hidrógeno, sin excluir los procesos fermentativos que ayudan a la proliferación de bacterias patógenas perjudiciales para los consumidores de este tipo de agua (agua doméstica).

La eficiencia en las bandejas de aireación se ven afectadas por el espacio entre estas mismas, temperatura del agua, carga hidráulica, espesor de la capa de soporte, orificios de las bandejas, etc. Es por esto, que se propone realizar varias series de pruebas, entre estas con ME, para desarrollar un modelo estadístico general con el fin de predecir el valor empírico del coeficiente cinético de la ecuación de Scott que, a su vez, pueda ser utilizado en el diseño de las bandejas y para determinar la eficiencia de los microorganismos.

OBJETIVOS

- ◆ Establecer combinaciones de los parámetros de diseño más adecuados en la remoción de CO₂, desorción de Oxígeno, con el uso de ME.
- ◆ Desarrollar un diseño con los parámetros establecidos en la construcción de las bandejas de aireación para la creación de un equipo potenciado con ME para el tratamiento de aguas.
- ◆ Determinar una concentración óptima de ME para el proceso de aireación.
- ◆ Establecer un protocolo para la enseñanza del tratamiento de aguas.

1.

MARCO TEÓRICO

1.1 CLASIFICACIÓN CONVENCIONAL DE TRATAMIENTOS PARA AGUAS

Antes de estudiar las tecnologías y los tratamientos que se utilizan para mejorar la calidad del agua *in situ*, conviene conocer la clasificación convencional de los distintos niveles de tratamiento que existen para el agua residual.

El tratamiento primario es un simple tratamiento físico, una separación de los elementos sólidos que contiene el agua. Su objetivo es la eliminación de los sólidos en suspensión y los materiales flotantes, y de una parte de la materia orgánica del agua.

El tratamiento secundario tiene como objetivo la eliminación de la materia orgánica biodegradable (en suspensión o disuelta), de los sólidos en suspensión y de los nutrientes (nitrógeno y fósforo), así como la eliminación parcial de los microorganismos patógenos. Existen dos alternativas para el tratamiento secundario: los tratamientos químicos y los tratamientos biológicos. Los resultados de ambos son bastante similares en cuanto a los efectos, pero su mecanismo funcional es distinto. El tratamiento químico exige la introducción de cantidades importantes de reactivos, un sistema de dosificación y un equipo de personal cualificado que, de forma continua, modifique las dosificaciones para el correcto rendimiento de este. En cambio, en los sistemas biológicos, la formación de flóculos, con peso suficiente para poder separarse de la masa de agua, se logra gracias a la acción enzimática y metabólica de los microorganismos que están en el agua residual (Hernández Muñoz, 2001).

Por último, los tratamientos terciarios o avanzados, mejoran la calidad del efluente de salida de un tratamiento secundario, optimizando la calidad del agua en sólidos en suspensión y la reducción de materia orgánica y de nutrientes. La desinfección del agua se incluye en esta etapa del tratamiento.

1.2 ALTERNATIVAS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS *IN SITU*

Las plantas satélites tratan el agua *in situ*, y están conectadas a la red de alcantarillado general, de manera que el exceso de agua y los residuos pueden ser eliminados por el sistema de drenaje que está conectado a una EDAR.

Muchos tipos diferentes de tecnologías de tratamiento pueden usarse en los sistemas satélite dependiendo del tipo de sistema satélite, de la cantidad de agua regenerada que se debe producir, de la calidad requerida en el agua regenerada y de restricciones espaciales y compatibilidades con los sistemas de colección de las aguas residuales existentes.

Las siguientes tecnologías pueden ser utilizadas para el tratamiento de las aguas residuales domésticas (aguas grises y aguas negras), y algunas de ellas para tratar el efluente de aguas pluviales antes de su utilización para uso no potable. Las tecnologías de tratamiento *in situ* de aguas se pueden clasificar, según la naturaleza del tratamiento, en tratamientos físicos, químicos, biológicos y de desinfección. Li et al. (2009).

1.2.1 Tratamientos físicos

Los procesos físicos consiguen una sustancial clarificación del agua y, además, reducen la carga orgánica. Sin embargo, no son suficientes para garantizar la reducción de materia orgánica, nutrientes, surfactantes y tensoactivos que puede presentar el agua residual doméstica. Por ello,

por sí solos, no son recomendados para el tratamiento de las aguas grises y negras. No obstante, los procesos físicos como el filtro de arena o las membranas de filtración se pueden usar como postratamientos para propósitos de mejora del aspecto del agua.

El filtro de arena típico es una caja forrada de hormigón o de cloruro de polivinilo, llena de material arenoso. Este atrapa y absorbe los contaminantes del agua residual cuando la hacemos pasar a través de él. Reduce, también, el número de microorganismos patógenos causantes de enfermedades que pueden estar presentes en el agua, pero no los elimina (es decir, no desinfectan). El filtro de arena, entonces, purifica el agua de tres formas: las partículas se separan físicamente de las aguas que entran en el filtro por medio de la filtración; en la absorción química, los contaminantes se pegan a la superficie de la arena y al crecimiento biológico en la superficie de la arena y en la asimilación, los microbios aeróbicos consumen los nutrientes de las aguas.

Otro proceso físico empleado es la filtración por membranas. Las membranas usadas para la microfiltración tienen un tamaño de poro de 0,1 – 10 μm . Estas membranas retienen todas las bacterias del efluente. Para la eliminación completa de los virus, se requiere la ultrafiltración. Los poros de las membranas de ultrafiltración pueden retirar de los fluidos partículas de 0,001 – 0,1 μm . En la ultrafiltración, el efluente es conducido al sistema por baja presión, donde membranas especiales, de alta resistencia, lo reciben para liberarlo de materiales de alto peso molecular y sólidos suspendidos. La ultrafiltración mediante membranas presenta una reducción muy importante de la DBO del agua, del orden del 98% (Li, Wichmann, Otterpohl, 2009), así como de la cantidad de nutriente fósforo y nitrógeno, aunque proporciona una limitada reducción de los orgánicos disueltos. El aspecto del agua es excelente, libre de sólidos en suspensión, con un bajo grado de turbidez, y sin rastros de coliformes. Sin embargo, el gasto de energía y el ensuciamiento de la membrana son factores clave que limitan su uso por falta de viabilidad económica en muchos casos.

Por otro lado, los procesos de micro y ultrafiltración por membranas no son suficientes, por sí solos, para asegurar que se cumpla con los requisitos de salubridad necesarios para la reutilización del agua, ya

que los residuos orgánicos restantes pueden provocar la proliferación de los patógenos en los sistemas de transporte y almacenamiento, así como limitar el efecto químico de la desinfección.

1.2.2 Tratamientos químicos

En comparación con los procesos físicos, los procesos químicos ofrecen resultados más satisfactorios en cuanto a reducción de materia orgánica y turbidez del agua, pero todavía no el suficiente como para utilizar sin restricción el flujo de agua resultante. Procesos como la electrocoagulación, seguida de una etapa de filtración y desinfección, son suficientes para alcanzar una calidad admisible y utilizarla, por ejemplo, en la descarga de los inodoros, si el flujo de entrada no está excesivamente contaminado.

La electrocoagulación consiste en añadir a las aguas, iones metálicos coagulantes mediante el uso de electrodos. Estos iones coagulan los contaminantes que hay en el agua, de modo similar a los coagulantes químicos como el alumbre o el cloruro férrico, permitiendo que los precipitados se eliminen, más fácilmente, mediante sedimentación. Los procesos químicos pueden eliminar eficientemente los sólidos en suspensión, la materia orgánica y los surfactantes en flujos de aguas grises poco contaminados. Por lo tanto, no son adecuados para tratar aguas negras. En general, los procesos químicos son muy poco usuales en los sistemas satélite de tratamiento de aguas *in situ*.

1.2.3 Tratamientos biológicos

El tratamiento biológico es la pieza central de los tratamientos de aguas residuales domésticas (aguas grises y aguas negras). Los procesos aeróbicos biológicos son capaces de conseguir una gran mejora de la turbidez y de la materia orgánica. La pobre eliminación de la materia orgánica y surfactantes hacen que los procesos anaeróbicos no sean adecuados para el tratamiento de las aguas grises, aunque se contaría con la ventaja de producir biogás. Después del proceso aeróbico, la mayoría de las sustancias orgánicas biodegradables se eliminan

y, consecuentemente, la proliferación de los microorganismos y los problemas de olor se evitan, haciendo el efluente más apto para poder ser almacenado por periodos más largos de tiempo. Sin embargo, se obtiene una escasa eliminación de microorganismos, sólidos en suspensión y turbidez, por lo que se requiere una etapa final de filtración y desinfección para conseguir una calidad que permita el uso urbano del agua tratada.

Los tratamientos biológicos suelen venir precedidos de una etapa física previa, como el uso de un tanque de sedimentación o una fosa séptica, para que se depositen los sólidos y se eliminen aceites y grasas. Los más extendidos para plantas de tratamiento satélite son: el *Rotating Biological Contactor* (RBC), el *Sequencing Batch Reactor* (SBR), y el *Membrane Bioreactor* (MBR).

El RBC consiste en una serie de grandes discos paralelos, llamados biodiscos, constituidos de poliestireno rígido atóxico, que rotan en torno a un eje común, de manera que medio disco está sumergido en el líquido, mientras que el otro está expuesto al aire y se oxigena. Los discos se mueven muy lentamente (entre 1 y 2 min⁻¹) a través de las aguas residuales. Rotating Biological Contactor [Asano et al., 2007]

En 10 o 12 días, los microorganismos forman una flora bacteriana en la superficie de los discos. La comunidad de microorganismos absorbe, directamente, la mayor cantidad de materia orgánica durante la fase de inmersión en el agua residual y el oxígeno necesario durante la fase de emersión. La capa de flora bacteriana que se adhiere a las placas, al alcanzar un espesor de unos 4 o 5 mm, se desprende del biodisco en forma de copos fácilmente sedimentables.

Su ventaja es la sencillez en su gestión, que sólo incluye tareas de limpieza periódica del depósito y de los biodiscos, y mantenimiento del motor. Por otro lado, el consumo de energía es muy bajo, y la eficiencia del tratamiento biológico es muy alta. Su inconveniente es que el tamaño y la compacidad del sistema lo hacen menos apto que el MBR y el SBR para alojarse en espacios reducidos. Esto representa una clara ventaja para los otros dos sistemas en las aplicaciones de plantas satélite de reciclaje *in situ* de aguas residuales domésticas, aunque,

el RBC también es una opción muy extendida, cuya eficacia ha sido constatada a lo largo de los años.

El SBR es una variación del proceso de lodos activados que minimiza requerimientos de espacio al realizar diversas etapas del tratamiento en un mismo depósito. En el SBR el agua residual es almacenada en un depósito pulmón, o en la cámara de aireación, hasta que un volumen suficiente (*batch*) es recolectado, momento en el cual el proceso empieza. El *batch* de agua residual es tratado por los microorganismos aeróbicos (lodos activados) y aireado durante el periodo de tratamiento. Después de que la reacción se completa, se detienen la aireación y la agitación, con lo que las bacterias floculadas y otras partículas sólidas sedimentan. El estrato depurado se descarga de la cámara, y entra el siguiente *batch* de agua residual. El llenado, reacción, descarga es un ciclo que se repite continuamente. Asano et al., 2007; <http://www.soliclima.com/>, 7 de marzo de 2010.

La principal ventaja es la compacidad del sistema, ya que permite que los tratamiento primario, biológico y de desinfección, se realicen en un mismo tanque. Esto lo hace una opción compacta e idónea para un gran número de aplicaciones en plantas satélite de tratamiento. Sus inconvenientes son que requieren válvulas, bombas y controles adicionales comparados con otros sistemas. El tiempo de residencia hidráulico es de unas 8 – 14h para la depuración de las aguas.

El MBR combina el tratamiento biológico con un sistema de membranas (en el rango de la ultrafiltración), para reducir la cantidad de materia orgánica del agua y eliminar los sólidos en suspensión. Las membranas sustituyen la sedimentación y la filtración, para separar la biomasa del agua tratada. Combinando el reactor biológico con un sistema de filtración por membranas, se reducen los requerimientos de espacio y los costes de tratamiento.

El MBR se considera una tecnología innovadora en el ámbito del tratamiento de aguas grises debido a la estabilidad del proceso y a su eficacia para eliminar patógenos, por lo que se ha empezado a considerar como una alternativa muy atractiva para los edificios urbanos de viviendas. El agua tratada por la membrana tiene muy poca turbidez.

Los sistemas de membrana consumen más energía, ya que suelen trabajar a presiones que superan los 2,0 bar [Al-Jayyousi, 2003].

Los MBR son particularmente adecuados para las aplicaciones satélites por su compactidad y su capacidad para ubicarse en espacios pequeños. Entre sus ventajas se pueden mencionar las siguientes: las instalaciones ocupan menos espacio, se obtiene un efluente de agua de mucha calidad, se reduce la producción de lodos y es un sistema de fácil manejo. Sin embargo, presentan problemas en el mantenimiento y la limpieza de las membranas. El ensuciamiento de la membrana incrementa, además, su resistencia hidráulica, con la demanda extra de energía por parte del sistema que eso conlleva. El pre-tratamiento siempre es requerido para prevenir la colmatación de los poros de la membrana. Otro inconveniente, es su elevado precio, que lo hace económicamente inviable para pequeñas comunidades de vecinos. [Asano et al., 2007]

1.2.4 Tratamientos de desinfección

El agua presenta una serie de enfermedades, asociadas a los patógenos que puede contener, incluyendo bacterias, protozoos y virus. Si las aguas no han sido desinfectadas antes de ser almacenadas, con el fin de reducir, de esta forma, el crecimiento patógeno, durante el almacenamiento su número crecerá significativamente. Esta situación puede ser inhibida por el uso de un tanque sellado de color oscuro, que previene que la luz natural y el oxígeno lleguen a entrar en contacto con las aguas.

El oxígeno y la luz natural promueven el crecimiento de microorganismos aeróbicos y de organismos fotosintéticos como algas que crecen y se reproducen.

Si la desinfección no tiene lugar antes del almacenamiento, se corre el riesgo de crear un estado anaeróbico en las aguas y, de ese modo, se incrementan los niveles de contaminación. Sin embargo, si hay un constante movimiento de flujo de agua (aprovisionamiento y descarga) esto podría evitarse. En cualquier caso, si las aguas tratadas van a

ser usadas para llenar la cisterna del retrete, o bien para el lavadero, se requiere de un sistema de desinfección sobredimensionado, ya que el número de patógenos aumentaría muy significativamente durante el almacenamiento.

La desinfección se puede conseguir mediante el uso de cloro, de ozono o de luz ultravioleta. La forma más común y a la vez el método más simple, es la cloración, usualmente obtenida por el uso del hipoclorito de sodio, en unas pastillas parecidas a las que se utilizan para desinfectar el agua de las piscinas. El ozono, método de desinfección químico, se genera *in situ* usando un dispositivo que aplica una diferencia de potencial de alto voltaje en el aire, y de esta forma disuelve el aire ozonizado a través del agua tratada. Por su parte, la luz UV se ha venido popularizando, y no necesita de sustancias químicas.

1.3 MICROORGANISMOS EFICIENTES

La Tecnología de los Microorganismos Eficientes, fue desarrollada por Teruo Higa, profesor de horticultura de la Universidad de Ryukyus en Okinawa, Japón. A comienzos de los años sesenta, el Profesor Higa comenzó la búsqueda de una alternativa que remplazara los fertilizantes y plaguicidas sintéticos y en los últimos años, su uso ha irrumpido en procesos de compostaje, tratamiento de aguas residuales, ganadería y limpieza del hogar.

Estudiando las funciones individuales de diferentes microorganismos, Higa encontró que el éxito de su efecto potenciador estaba en su mezcla; por esto, se dice que los microorganismos eficientes (ME) trabajan en sinergia, ya que la suma de los tres tiene mayor efecto que cada uno por separado. Los ME están compuestos por bacterias fotosintéticas o fototrópicas (*Rhodospseudomonas* spp), bacterias ácido lácticas (*Lactobacillus* spp) y levaduras (*Saccharomyces* spp).

1.3.1 Bacterias fotosintéticas (*Rhodopseudomonas spp*)

Estas bacterias se caracterizan por ser fotótrofas, es decir, que producen energía usando luz, proceso similar al que realizan las plantas con la fotosíntesis. Son productoras de enzimas capaces de degradar compuestos orgánicos e inorgánicos. Estas son bacterias que sintetizan sustancias útiles a partir de secreciones de raíces, materia orgánica y gases dañinos, usando la luz solar y el calor como fuentes de energía. Las sustancias sintetizadas comprenden aminoácidos, ácidos nucleicos, sustancias bioactivas y azúcares. Estos metabolitos son absorbidos directamente por ellas, y actúan también como sustrato para incrementar la población de otros microorganismos eficientes.

1.3.2 Bacterias ácido lácticas (*Lactobacillus spp*)

Estas bacterias producen ácido láctico a partir de azúcares y otros carbohidratos sintetizados por bacterias fototróficas y levaduras. El ácido láctico es un fuerte esterilizador, que suprime microorganismos patógenos e incrementa la rápida descomposición de materia orgánica. Las bacterias ácido lácticas aumentan la fragmentación de los componentes de la materia orgánica, tales como la lignina y la celulosa.

1.3.3 Levaduras (*Saccharomyces spp*)

Las sustancias bioactivas, como hormonas y enzimas, producidas por las levaduras, promueven la división celular activa. Sus secreciones son sustratos útiles para otros microorganismos eficientes como bacterias ácido lácticas y actinomicetos (bacterias que ayudan a descomponer la materia orgánica transformándola en humus, liberando nutrientes).

El conjunto de estos microorganismos genera su propio alimento para crecer, y, a su vez, libera sustancias que pueden ser beneficiosas para los cultivos. Para que esta tecnología esté lista para su aplicación, es necesario realizar un procedimiento llamado Activación de los Microorganismos Eficientes.

2

METODOLOGÍA

2.1 DISEÑO DEL PROTOTIPO

Las bandejas de aireación para el prototipo son de plástico y tienen unas perforaciones sobre ellas; además, tienen una inclinación para asegurar la distribución del agua cayendo sobre las otras, en similares condiciones, variables de diseño que son importantes. Tienen unos 0.60, 0.75 y 0.95 cm aproximadamente (La Motta, 1996).

- ◆ Se colocó medio grueso del material en las bandejas. Se utilizaron esferas de material cerámico (Scott, 2000).
- ◆ El medio grueso utilizado tiene un diámetro de 5-15 cm, que mejora la eficiencia en el intercambio de gases y la distribución del agua (Scott, 2000).
- ◆ El espesor del medio grueso es una variable por experimentar en las bandejas. Serán tres variables: 15, 23 y 30 cm. (Romero, 2000).
- ◆ El área de cada bandeja es aproximadamente de 60*60 cm. y cuatro bandejas de aireación (Romero, 2000).
- ◆ En los momentos de ensayo se tuvieron las bandejas de aireación en un lugar donde corría el viento ya que esto mejora la eficiencia del proceso (La Motta 1996).
- ◆ La carga hidráulica es otro parámetro por evaluar. Son tres variables: 2.5, 3.5 y 4.5 L/s (La Motta 1996).
- ◆ La distancia vertical de las bandejas es un parámetro importante, ya que entre más tiempo tenga el agua contacto directo con la atmósfera mayor será su aireación. Esta es de 70 cm. (Scott, 2000).

- ◆ Se insertaron paredes de madera para prevenir la pérdida de agua, al salpicar esta, y la influencia del viento.

En un segundo ensayo, se llevó a cabo el mismo procedimiento para agua doméstica, introduciendo un inóculo de ME en la bandeja 1 a los cuales ya se les comprobó su actividad por medio de siembras masivas con sus respectivas diluciones y se realizaron los mismos análisis, tales como:

Pruebas de Oxígeno disuelto: se realizó con el método multiparamétrico de medición in situ. Este es importante ya que su medición favoreció el análisis de los resultados pues no hubo transporte de muestras que pudieran alterar el valor.

Pruebas de CO₂: se midieron con base en el estándar métodos, cesión 4500-CO₂ A. El CO₂ libre en el agua potable se determinó con el método de titulación con el indicador de fenolftaleína (awwa and apha). Este método es el más rápido y es satisfactorio para pruebas de campo. Los reactivos utilizados fueron los siguientes:

- ◆ Reactivo de hidróxido de sodio
- ◆ Fenolftaleína

Prueba de la Demanda Biológica de Oxígeno: esta se midió con base en el estándar métodos, cesión 5220-D. La prueba de la DBO es un procedimiento experimental, tipo bioensayo, que mide el oxígeno requerido por los organismos en sus procesos metabólicos al consumir la materia orgánica presente en las aguas residuales o naturales. Las condiciones estándar del ensayo incluyeron incubación en la oscuridad a 20°C por un tiempo determinado, generalmente cinco días. Las condiciones naturales de temperatura, población biológica, movimiento del agua, luz solar y concentración de oxígeno no pueden ser reproducidas en el laboratorio. Los resultados obtenidos se tomaron en cuenta para lograr una adecuada interpretación.

Prueba microbiológica: se hicieron siembras aeróbicas masivas y selectivas en agar nutritivo para la identificación de densidad poblacional microbiana interactuando en el agua del modelo.

2.2 CRECIMIENTO DE ME EN LABORATORIO

Se realizaron los medios de cultivos enriquecidos SPC, EMB según insertos MERCK, donde se vertieron las diluciones de los ME en una cantidad de 0,1 mL, y se esparcieron con pipetas de un mL de vidrio asegurando su distribución en el medio dentro de la caja de petri; se incubaron, luego, a 37 grados centígrados y se leyeron; la UFC se contó 24 horas después de su incubación. Si cultivos de microorganismos benéficos son efectivos después de su inoculación en el coque, es importante que su población inicial esté en un nivel de umbral crítico. Esto ayuda a asegurar que la cantidad de sustancias bioactivas producidas por ellos sea suficiente para alcanzar los posibles efectos deseados en la purificación del agua. Si esas condiciones no se encuentran, la introducción de microorganismos, no importa lo útiles que sean, tendrá un pequeño o ningún efecto. Actualmente, no hay pruebas químicas que puedan predecir la probabilidad de que un microorganismo particular, en la inoculación al agua, alcance los resultados deseados. La aproximación más confiable se da al inocular el microorganismo benéfico en el agua como parte de un cultivo mixto, y con una suficientemente alta densidad del inóculo para maximizar la probabilidad de su adaptación al medioambiente y a las condiciones ecológicas (Higa y Wididana, 1991b; Parr et al., 1994).

2.3 PREENRIQUECIMIENTO DE ME

El preenriquecimiento fue realizado en medios líquidos (agua peptonada, caldo nutritivo, caldo lactosado) que son medios no inhibidores del resto de la flora acompañante. Sin embargo, es importante que en la elección del medio que se va a utilizar se considere el grado de injurias subletales derivadas del proceso tecnológico. En este caso, se utilizó el agua peptonada tamponada (pH 7.2), la cual asegura la manutención del pH durante 24 horas, lo que sumado al período de incubación permite el incremento de células que son sensibles a la disminución del pH. A estos medios se les adicionó sustancias que contrarrestaron los compuestos inhibidores presentes en el agua; así mismo, se aseguró el pH que es un factor muy importante para el crecimiento de los ME.

Se tomó 1 mL del inóculo de ME y se disolvieron en 9 mL de agua peptonada creando la primera dilución, la cual, posteriormente, se incubó. Pasadas las 24 horas se inició el proceso de enriquecimiento.

2.4 ENRIQUECIMIENTO DE ME

El enriquecimiento selectivo estuvo destinado a inhibir la flora acompañante. Al estar adicionados de sustancias químicas inhibitoras y sumado a los tiempos y temperatura de incubación óptimas permitió su desarrollo por sobre otros microorganismos, lo que se confirma en los medios selectivos elegidos o por otras pruebas de identificación. Normalmente, el rango de T° de incubación fue de 35°C a 43°C por períodos de 16 a 24 horas. Comúnmente, los caldos selectivos que se utilizaron, fueron selenito con cistina (SC), verde brillante, tetrionato (TT), y el caldo cloruro de magnesio-verde malaquita de Rappaport-Vassiliadis (RV).

Se tomó 1 mL de la primera dilución y se realizó, por agotamiento, una siembra en superficie en agar selectivo (SPC); pasadas las 24 h se procedió a realizar el recuento en placa que consiste en contar la UFC presente después de su incubación.

2.5 RECUESTO EN PLACA DE ME

Esta técnica se basó en colocar en un medio de cultivo adecuado un volumen determinado de muestra. Cada una de las células aisladas tuvieron lugar, después de la incubación correspondiente. El sistema fue fácil de utilizar en el caso de células aisladas. Se llevó a cabo sembrando en superficie (extendiendo un volumen dado de muestra sobre el medio de cultivo sólido). Para que el sistema de recuento en placa tuviera validez estadística, fue necesario contar entre 30 y 300 colonias con objeto de disminuir el error de la medida y, así mismo, para tener en este estudio la suficiente densidad poblacional microbiana en el proceso de potenciación para el tratamiento de aguas.

2.6 ENSAYOS

Primero se determinó el origen de la muestra de agua. El agua potable se recogió de la salida de las llaves del laboratorio de Ciencias Básicas y el agua residual doméstica se recolectó de cocinas de domicilios. Se vertieron en el , desde la bandeja 2 para agua potable y desde la bandeja 1 para agua residual doméstica, donde la aplicabilidad de los diferentes tipos de aireadores y su dosificación se determinó, controlando el tiempo de aireación y la eficiencia de remoción; esta última, como el porcentaje entre la variable química por remover en el efluente y el afluente de los dos tipos de aguas.

2.6.1 Ensayo para agua doméstica

-Diagnóstico inicial de oxígeno disuelto, DQO y DBO para el agua doméstica con multiparámetro y técnicas anteriormente descritas (pg. 6): se introdujo el agua doméstica desde la bandeja 1 para que interactuara con el inóculo de ME inoculado en el coque durante 5 días, donde empezaron a bajar las características organolépticas.

-Diagnóstico final de oxígeno disuelto, DQO y DBO para el agua doméstica con multiparámetro y técnicas anteriormente descritas (pg. 6): al cumplir características similares al agua potable, se abrió la llave de la bandeja 1 después de los 5 días, para que actuara normalmente el proceso, como se describió en el ensayo para agua potable.

2.6.2 Ensayo para agua potable

Diagnóstico inicial de oxígeno disuelto, DQO y DBO para el agua potable con multiparámetro y técnicas anteriormente descritas (pg. 11): se introdujo el agua potable en la bandeja , la cual por decantación gravitacional y por su inclinación cayó a la bandeja 3 donde encontró un lecho filtrador con coque que aumentaría la posibilidad de sorción de características adversas a la potabilización; allí también, por acción gravitacional e inclinación en un tiempo determinado, cayó a la bandeja 4 la cual se encargó de la recepción final de todo el proceso de tratamiento

del agua, y de donde se recolectó la muestra final de análisis para su comparación y conclusión frente a la efectividad del sistema.

2.7 PRUEBA MICROBIOLÓGICA FINAL

Se realizó un enriquecimiento selectivo, descrito anteriormente (p 12) para determinar la densidad poblacional bacteriana que posiblemente se encuentra en el final del tratamiento de la misma, lo cual indujo a posibles usos del agua tratada.

2.8 DESINFECCIÓN

Única y exclusivamente se realizó en este estudio, la desinfección del agua que se utilizaría para consumo humano, lo cual no es uno de sus objetivos; sin embargo, según la efectividad del prototipo se pudieron manejar concentraciones bajas de cloro para este fin.

3.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

PROTOTIPO

La construcción del prototipo evidencia que es un pretratamiento, como parte de los procesos que buscan una calidad del agua cruda y residual doméstica apropiada a las necesidades del usuario y al reuso de las mismas; esto generó un cierto número de operaciones mecánicas, físicas y/o químicas, con el fin de separar del agua la mayor cantidad posible de materias, que por su naturaleza o tamaño, pudieran ser motivo de posteriores problemas en el tratamiento. Esto dio origen a un diseño combinado.

3.1 PROTOTIPO PARA AGUA POTABLE

En la aireación por bandejas se puso en contacto el agua cruda con el aire, con el propósito de modificar la concentración de sustancias volátiles contenidas en ella. La aireación se recomienda para:

Transferir oxígeno al agua y aumentar con ello el oxígeno disuelto.
Disminuir la concentración de dióxido de carbono (CO₂).
Remover compuestos orgánicos volátiles (COV).

La aplicabilidad de las bandejas aireadoras y su dosificación fueron determinadas a través de ensayos controlados en el tiempo de aireación y la eficiencia de remoción; esta se realizó en 6 horas, teniendo en cuenta que el porcentaje entre la variable química por remover en la cantidad de agua, fue de 4 litros,.

Las bandejas de coque consistieron en una serie de superficies de 0.15 a 0.2 m² (por cada 10 m³ de capacidad) con un lecho de coque de espesor de 0.015 a 0.03 m. conformado por partículas de 0.02 a 0.05 m. sobre las cuales se vertía el agua cruda a una carga máxima de 10 m³/m² por hora, de tal forma que se formara una capa de aproximadamente 0.015 m. Lo que allí se generó fue la caída del agua de bandeja a bandeja y por ende una aireación con la añadida capacidad del carbón para absorber y adsorber químicos.

Figura 1y 2. Prototipo completo y prototipo en funcionamiento para agua potable



Fuente. El autor.

Diagnóstico del prototipo para agua potable

Tabla 1. Comparación del antes y después de las pruebas de DBO, DQO y SST.

ANTES DEL TRATAMIENTO PROTOTIPO				DESPUÉS DEL TRATAMIENTO PROTOTIPO			
PRUEBA	E1	E2	E3	PRUEBA	E1	E2	E3
DBO	1.7 ppm	2.5 ppm	2.2 ppm	DBO	0.8 ppm	0.9 ppm	0.9 ppm
DQO	3.0 ppm	3.5 ppm	3.2 ppm	DQO	3.4 ppm	3.6 ppm	3.3 ppm
SST	1.1 ppm	1.4 ppm	1.4 ppm	SST	0.5 ppm	0.7 ppm	0.5 ppm

En estos resultados se encuentra que entre los ensayos antes del tratamiento y después del tratamiento no existe alguna diferencia significativa, contrario si la comparación se hace solamente frente al antes y después del tratamiento, ya que los valores de DBO, DQO y SST evidencian una diferencia significativa al 60 % de efectividad del prototipo; a pesar de que los datos no corresponden a un riesgo de contaminación del agua potable, si lleva a que el proceso del prototipo efectúe una acción eliminadora de las características, proporcionalmente a la acción biológica de los compuestos químicos en el agua potable.

Figura 3. Diferencia de las características de los ensayos antes del prototipo.

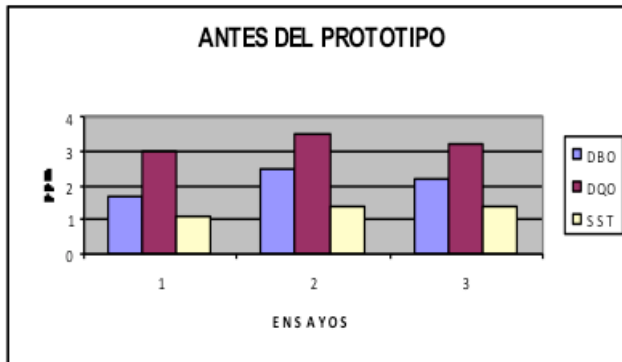


Figura 4. Diferencia de las características de los ensayos después del prototipo.

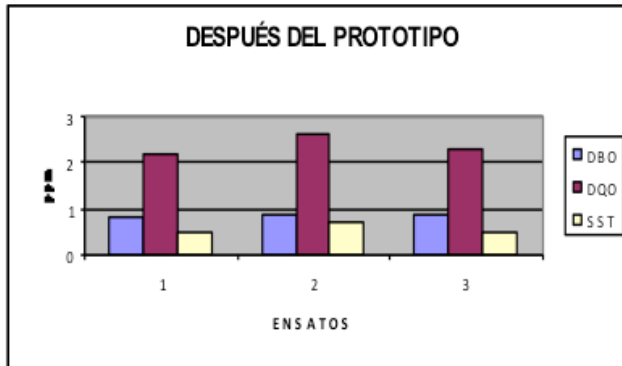


Tabla 2. Porcentaje de efectividad para agua potable ensayo 1.

EFECTIVIDAD DEL PROCESO EN EL PROTOTIPO E1			
PRUEBA	E1 ANT	E1 DES	%
DBO	1.7 ppm	0.8 ppm	47
DQO	3.0 ppm	2.2 ppm	73
SST	1.1 ppm	0.5 ppm	45

Tabla 3. Porcentaje de efectividad para agua potable ensayo 2.

EFECTIVIDAD DEL PROCESO EN EL PROTOTIPO E2			
PRUEBA	E2 ANT	E2 DES	%
DBO	2.5 ppm	0.9 ppm	36
DQO	3.5 ppm	2.6 ppm	74
SST	1.4 ppm	0.7 ppm	50

Tabla 4. Porcentaje de efectividad para agua potable ensayo 3.

EFECTIVIDAD DEL PROCESO EN EL PROTOTIPO E3			
PRUEBA	E3 ANT	E3 DES	%
DBO	2.2 ppm	0.9 ppm	40
DQO	3.2 ppm	2.3 ppm	71
SST	1.4 ppm	0.5 ppm	35

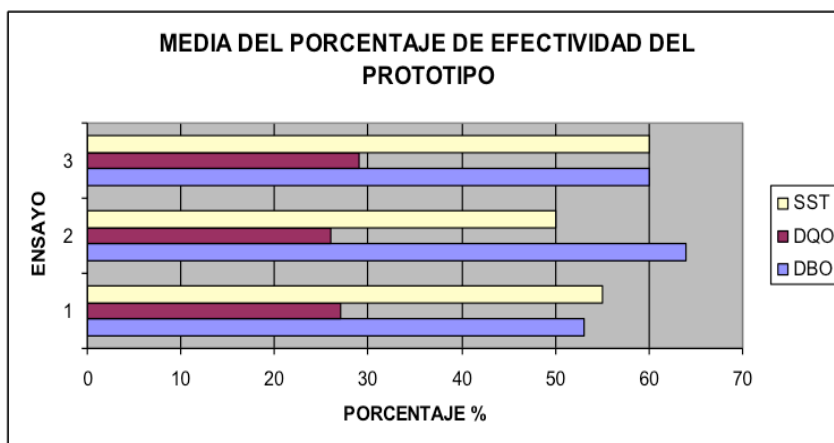
La efectividad del sistema de bandejas de aireación, según los ensayos demuestra que la diferencia del porcentaje hace óptimo el proceso así:

Para el ensayo 1 DBO el prototipo es óptimo en un 53%, para el DQO en un 27% y para SST en un 55%.

Para el ensayo 2 DBO el prototipo es óptimo en un 64%, para el DQO en un 26% y para SST en un 50%.

Para el ensayo 3 DBO el prototipo es óptimo en un 60%, para el DQO en un 29% y para SST en un 65%.

Figura 5. Porcentaje de efectividad del prototipo por ensayo.



Los resultados obtenidos evidencian una eficiencia significativa, teniendo en cuenta que los parámetros medidos en el inicio de las

pruebas no inducen a presentar rangos por fuera de la norma, frente a las características del agua potable. Pero sí concluye la efectividad del proceso para bajar los índices que puedan afectar esas características, por lo que se estipula un proceso para dicho fin.

3.2 PROTOTIPO PARA AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA

En este segundo paso del proceso, se adicionó una bandeja (1) al inicio del prototipo con el fin de modificar características que sobrepasaran los límites permitidos del agua para su reuso. Esta bandeja se encarga de potenciar las reacciones bioquímicas para disminuir los rangos de DBO, DQO y SST, y en secuencia realizar un proceso de aireación igual al paso anterior como si fuera agua potable. Este ejercicio innovador se realizó con ME los cuales efectuaron dichas reacciones bajando los niveles de contaminación por medio de sus metabolismos después de su estandarización, dentro del prototipo, en diluciones óptimas para complemento del proceso de tratamiento.

3.2.1 Densidad poblacional y concentración del inóculo de ME

Se realizaron 3 secuencias de recuento en placa en la primera dilución 1:10 donde se obtuvo:

Tabla 5. Resultado del recuento en placa de microorganismos eficientes

Secuencia	Cepa 1 ME	Cepa 2 ME	Cepa 3 ME
1	42 X 10 ⁶ Ufc/ml	43 X 10 ⁶ Ufc/ml	55 X 10 ⁶ Ufc/ml
2	32 X 10 ⁶ Ufc/ml	50 X 10 ⁶ Ufc/ml	50 X 10 ⁶ Ufc/ml
3	39 X 10 ⁶ Ufc/ml	44 X 10 ⁶ Ufc/ml	51 X 10 ⁶ Ufc/ml

Fuente. El autor.

Figura 6. Recuento en placa de microorganismos eficientes



Fuente. El autor.

Este resultado evidencia que los ME no han perdido su efectividad potencial en el sustrato de conservación, y su acción es efectiva bajo las características y parámetros in Vitro. También se evidencian unos crecimientos superiores a 300 colonias por placas contadas. Esto asegura que bajo la proporción 1:10 en un amortiguador como el coque, los ME pueden crear una película en menos de 12 horas, ya que la media de crecimiento, según los recuentos, inducen que hay triplicidad en la cinética de crecimiento de los microorganismos y puede invadir el área de la bandeja en muy corto tiempo, y, a su vez, disminuir el tiempo de acción bioquímica con el agua que se va a tratar de 15 a 5 días. Este fue el tiempo de almacenamiento del agua doméstica tratada en la bandeja 1 del prototipo.

3.2.2 Prototipo para agua residual doméstica con ME

La aplicabilidad de las bandejas aireadoras y su dosificación, fueron determinadas a través de ensayos, controlados, en este caso, por el tiempo de aireación, el metabolismo de los microorganismos eficientes y la eficiencia de remoción; esta, como el porcentaje entre la variable química por remover en la cantidad de agua, que fue de 4 litros en 5 días.

La primera bandeja consistió en el almacenamiento y manutención de los microorganismos eficientes con coque, vertiendo el agua residual doméstica por 5 días, tiempo en el que se encontró la mayor efectividad metabólica de los microorganismos, bajando los niveles de contaminación. Seguido a esto, después de los cinco días, se realizó el procedimiento normal expuesto anteriormente en el tratamiento del agua potable, aclarando que esta adición se utiliza para encontrar unas características óptimas para el reuso del agua residual doméstica que se va a tratar.

Figura 7 y 8. Prototipo completo y prototipo en funcionamiento para agua residual doméstica



Fuente. El autor.

3.2.3 Diagnóstico del prototipo para agua residual doméstica

Tabla 6. Comparación del antes, durante (EM) y después de las pruebas de DBO, DQO y SST.

ANTES DEL TRATAMIENTO PROTOTIPO				DURANTE EL TRATAMIENTO CON MICROORGANISMOS			
PRUEBA	E1	E2	E3	PRUEBA	E1	E2	E3
DBO	7.7 ppm	7.5 ppm	7.2 ppm	DBO	4.8 ppm	4.9 ppm	4.9 ppm
DQO	6.0 ppm	6.5 ppm	6.2 ppm	DQO	4.4 ppm	4.6 ppm	4.3 ppm
SST	5.1 ppm	5.4 ppm	5.4 ppm	SST	3.5 ppm	3.7 ppm	3.5 ppm

DESPUÉS DEL TRATAMIENTO PROTOTIPO			
PRUEBA	E1	E2	E3
DBO	2.8 ppm	2.6 ppm	2.9 ppm
DQO	2.4 ppm	2.6 ppm	2.3 ppm
SST	1.5 ppm	1.7 ppm	1.8 ppm

Estos resultados muestran que en la comparación entre los ensayos, antes, durante (ME) y después del tratamiento respectivamente, no se encuentra alguna diferencia significativa de forma individual; contrario, si la comparación se hace solamente frente al antes, el durante y después del tratamiento, ya que los valores de DBO, DQO y SST evidencian una diferencia significativa porcentual de efectividad del prototipo. Este caso es de suma importancia pues los datos obtenidos sobrepasan los límites de contaminación respecto al DBO y muy cercano a ellos, refiriéndonos al DQO y SST, lo que obliga al prototipo a incrementar su potencia con ME, eliminando esas características que descategorizan al agua residual doméstica para su reuso, como en la actualidad se puede hacer en la agricultura, en la limpieza, en la industria de enfriamiento etc.

Figura 9. Diferencia de las características de los ensayos antes del prototipo

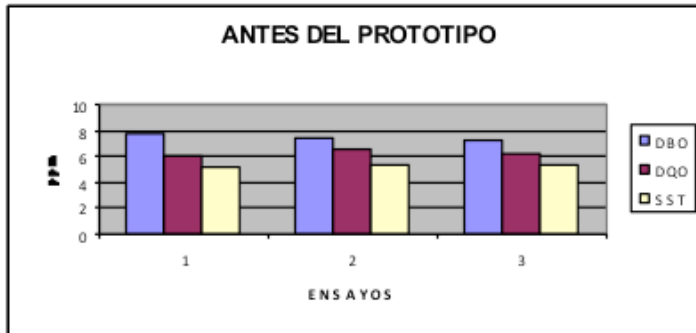


Figura 10. Diferencia de las características de los ensayos durante el prototipo (ME)

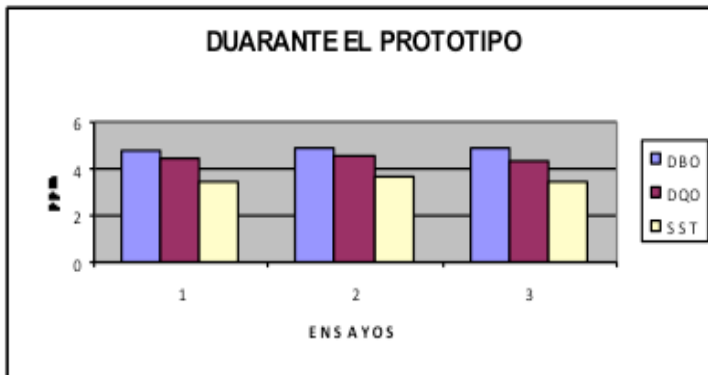


Figura 11. Diferencia de las características de los ensayos después del prototipo.

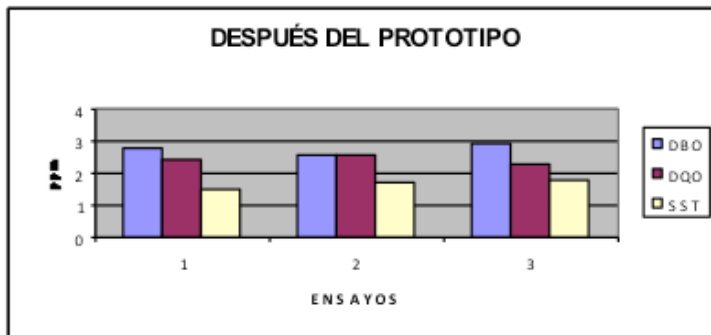


Tabla 7. Porcentaje de efectividad para agua residual doméstica ensayo 1.

EFECTIVIDAD DEL PROCESO EN EL PROTOTIPO E1					
PRUEBA	E1 ANT	% ANT-DUR	E1 DUR	% DUR-DES	E1 DES
DBO	7.7 ppm	38%	4.8 ppm	42%	2.8 ppm
DQO	6.0 ppm	27%	4.4 ppm	45%	2.4 ppm
SST	5.1 ppm	31%	3.5 ppm	57%	1.5 ppm

Tabla 8. Porcentaje de efectividad para agua residual doméstica ensayo 1.

EFECTIVIDAD DEL PROCESO EN EL PROTOTIPO E2					
PRUEBA	E1 ANT	% ANT-DUR	E1 DUR	% DUR-DES	E1 DES
DBO	7.5 ppm	35%	4.9 ppm	47%	2.6 ppm
DQO	6.5 ppm	29%	4.6 ppm	43%	2.6 ppm
SST	5.4 ppm	31%	3.7 ppm	54%	1.7 ppm

Tabla 9. Porcentaje de efectividad para agua residual doméstica ensayo 3.

EFECTIVIDAD DEL PROCESO EN EL PROTOTIPO E3					
PRUEBA	E1 ANT	% ANT-DUR	E1 DUR	% DUR-DES	E1 DES
DBO	7.5 ppm	35%	4.9 ppm	41%	2.9 ppm
DQO	6.5 ppm	34%	4.3 ppm	47%	2.3 ppm
SST	5.4 ppm	35%	3.5 ppm	49%	1.8 ppm

La efectividad del sistema de bandejas de aireación potenciada con ME, según los ensayos, demuestra que la diferencia del porcentaje hace óptimo el proceso así:

Para el ensayo 1 DBO antes-durante el prototipo es óptimo en un 38%, para el DQO en un 27% y para SST en un 31%.

Para el ensayo 1 DBO durante-después el prototipo es óptimo en un 42%, para el DQO en un 45% y para SST en un 57%.

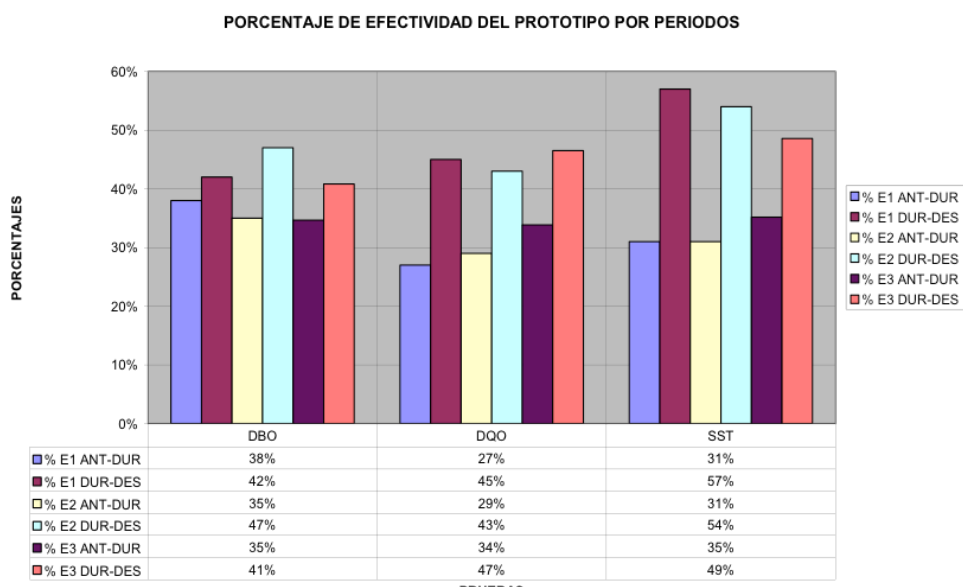
Para el ensayo 2 DBO antes-durante el prototipo es óptimo en un 35%, para el DQO en un 29% y para SST en un 31%.

Para el ensayo 2 DBO durante-después el prototipo es óptimo en un 47%, para el DQO en un 43% y para SST en un 54%.

Para el ensayo 3 DBO antes-durante el prototipo es óptimo en un 35%, para el DQO en un 34% y para SST en un 35%.

Para el ensayo 3 DBO durante-después el prototipo es óptimo en un 41%, para el DQO en un 47% y para SST en un 49%.

Figura 12. Porcentaje de efectividad del prototipo por ensayo.



Los resultados obtenidos evidencian una eficiencia significativa, teniendo en cuenta que los parámetros que se midieron en el inicio de las pruebas inducen la presentación de rangos por fuera de la norma como lo es un agua residual doméstica, exceptuando los parámetros de DQO. Pero sí concluye la efectividad del proceso para bajar los índices que puedan afectar esas características, por lo que se estipula que es un óptimo proceso para tratar los índices de DBO y SST y mantener más bajos los de DQO.

En síntesis, la comparación de las dos pruebas del prototipo para el tratamiento de agua potable y agua residual doméstica, arroja un

resultado primordial ya que esta alternativa de forma complementaria muestra que su efectividad para DBO está en un rango del 35% al 64%, para DQO, en un rango del 27% al 47% y para SST, en un rango del 31% al 65%.

Dicho resultado muestra que la alternativa de bandejas de aireación potenciada con ME, es una herramienta innovadora para bajar los índices de posibles contaminaciones en agua potable y agua residual doméstica, para su uso y reuso respectivamente.

3.2.4 Diagnóstico microbiológico final del prototipo para agua residual doméstica

Tabla 10. Crecimiento microbiano final del agua residual doméstica tratada en el prototipo.

Dilución	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3
1	12 X 100 Ufc/ml	13 X 100 Ufc/ml	10 X 100 Ufc/ml
2	05 X 100 Ufc/ml	10 X 100 Ufc/ml	07 X 100 Ufc/ml
3	02 X 100 Ufc/ml	07X 100Ufc/ml	04 X 100 Ufc/ml

Este resultado evidencia la efectividad de retención que tiene el prototipo para darle un reuso al agua, así:

Tabla 11. Posibles usos del agua residual doméstica tratada en el prototipo de aireación.

USO	MICROORGANISMOS DE IMPORTANCIA	OTROS MICROORGANISMOS
Residenciales: riego de jardines, descarga de aparatos sanitarios, sistemas de calefacción y refrigeración de aire y otros usos domésticos.	<i>Escherichia coli</i> 0 ufc /100 mL	<i>Legionella spp.</i> (si aerosoles) < 1000 ufc/L
Servicios urbanos: riego de zonas verdes urbanas (parques, campos deportivos) baldeo de calles; sistemas contra incendios; fuentes y láminas ornamentales. Lavado industrial de vehículos.	<i>Escherichia coli</i> < 200 ufc/100 mL	<i>Legionella spp.</i> (si aerosoles) < 1000 ufc/L
Cultivos de Invernadero. Riego de cultivos para consumo en crudo. Frutales regados por aspersión.	<i>Escherichia coli</i> < 200 ufc/100 mL	<i>Legionella spp</i> (si aerosoles) < 1000 ufc/L
Riego de pastos para consumo de animales productores de leche o carne. Riego de cultivos destinados a industrias conserveras y productos que no se consuman crudos. Riego de frutales excepto por aspersión. Acuicultura	<i>Escherichia coli</i> <1.000 ufc/100 mL	No se fija límite <i>Taenia saginata</i> y <i>T. Solium</i>
Riego de cultivos industriales, viveros, forrajes ensilados, cereales, semillas oleaginosas y cultivo de flores ornamentales, excepto por aspersión	<i>Escherichia coli</i> <10.000 ufc/100 mL	No se fija límite
Refrigeración industrial. Queda prohibida la reutilización de aguas depuradas en los circuitos de refrigeración industrial de la industria alimentaria y similar.	<i>Escherichia coli</i> <10.000 ufc/100 mL	<i>Legionella spp</i> <100 ufc/L
Riego de campos de golf	<i>Escherichia coli</i> <200 ufc/100 mL	No se fija límite
Estanques, láminas de agua y caudales circulantes ornamentales, en los que está impedido el acceso del público al agua.	<i>Escherichia coli</i> <10.000 ufc/100 mL	No se fija límite
Riego de bosques, zonas verdes y de otro tipo no accesibles al público. Silvicultura.	<i>Escherichia coli</i> No se fija límite	No se fija límite
Recarga de acuíferos por percolación localizada a través del terreno.	<i>Escherichia coli</i> <1.000 ufc/100 mL	No se fija límite
Recarga de acuíferos por inyección directa	<i>Escherichia coli</i> 0 ufc/100 mL	No se fija límite

3.2.5 Desinfección

La desinfección del agua para este tipo de tratamiento puede ser muy eficaz cuando la inactivación química de los contaminantes microbiológicos en agua natural o no tratada es normalmente uno de los pasos finales de la purificación para la reducción de microorganismos patógenos en el agua. En este caso se tendría en cuenta el tipo de reuso del agua para tal fin, por lo que no sería necesario, según los resultados obtenidos en el estudio.

3.3 DISEÑO GENERAL DEL PROTOTIPO EN UN EQUIPO DE FILTRACIÓN

Según el funcionamiento del prototipo se obtuvo un diseño que lo convierte en un equipo tecnificado para el tratamiento de aguas.

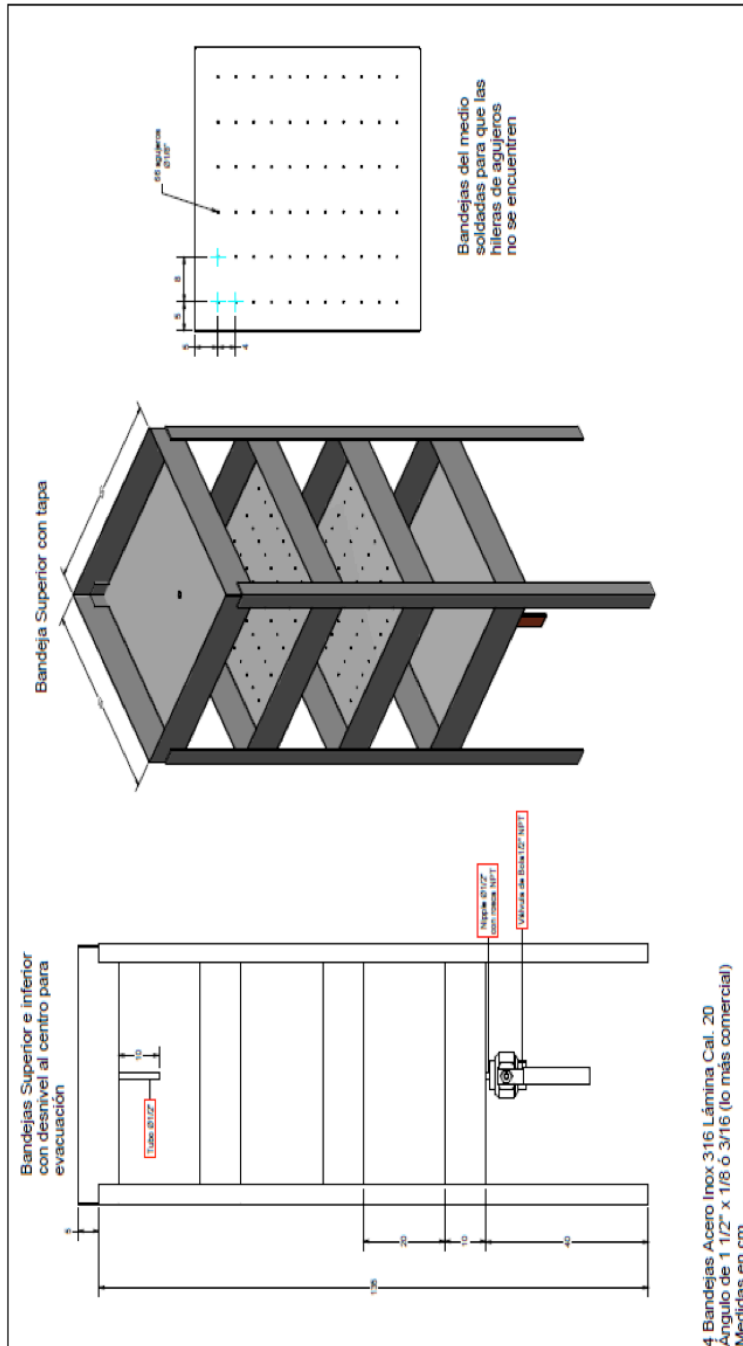
obtienen dimensiones para que en un próximo proyecto se construya y ubique en el Laboratorio de Ciencias Básicas de la Universidad EAN, para la prácticas académicas, la investigación y la posible prestación de servicios.

Figura 13. Vista general del equipo de filtración a partir del prototipo.



- Diseño final del equipo de filtración

Figura 14. Detalle de diseño del equipo de filtración a partir del prototipo



Fuente. El autor.

3.4 PROTOCOLO ACADÉMICO PARA LA ENSEÑANZA DEL PROCESO DE FILTRACIÓN

Las diferentes actividades agrícolas, ganaderas, industriales y recreacionales del ser humano han traído como consecuencia la contaminación de las aguas superficiales con diversas sustancias químicas y microbiológicas, además del deterioro de sus características organolépticas.

Para hacer frente a este problema, el agua debe ser tratada mediante una serie de operaciones o procesos unitarios a fin de purificarla o potabilizarla para que recupere sus características físico-químicas y pueda ser vertida en fuentes superficiales sin afectar la calidad de las mismas.

Una operación unitaria es un proceso químico, físico o biológico mediante el cual las sustancias objetables que contiene el agua son removidas o transformadas en sustancias inocuas. La mayoría de operaciones origina cambios en la concentración o en el estado de una sustancia, que es desplazada o incorporada en la masa de agua. Son ejemplos de ello, la eliminación de sólidos presentes en el agua mediante el proceso de filtración y la introducción de oxígeno al agua mediante el proceso de aireación.

La filtración es una operación unitaria en la que una mezcla heterogénea de un fluido y las partículas de un sólido se separan mediante el uso de un medio filtrante, que permite el paso del fluido, pero retiene la mayor cantidad de las partículas sólidas. Por consiguiente, esta operación implica el paso de un fluido a través de un filtro o medio poroso. También permite remover partículas suspendidas y coloidales presentes en una suspensión acuosa que fluye a través del medio poroso, así como clarificar el agua, logrando la producción de agua de buena calidad.

Existen diferentes tipos de filtración, pero en todos, la mezcla fluye, gracias a la acción de una fuerza impulsora, que puede ser la gravedad, la presión, el vacío, la fuerza centrífuga, etc. El medio filtrante retiene y soporta las partículas sólidas que van formando una torta porosa sobre la que se sobreponen estratos sucesivos a medida que el líquido

va atravesando tanto la torta, como el medio filtrante. (Brown, 1965). Durante el proceso, actúan una serie de mecanismos de remoción cuya eficiencia depende de las características de la suspensión (agua más partículas) y del medio poroso empleado; este proceso se puede emplear como único tratamiento cuando las aguas son muy claras o como proceso final para eliminar la excesiva turbiedad.

Los equipos de filtración se clasifican de acuerdo con la naturaleza de la fuerza impulsora que provoca la filtración en:

- ◆ Filtros por gravedad.
- ◆ Filtros de placas y marcos (filtros prensa).
- ◆ Filtros discontinuos de láminas.
- ◆ Filtros rotatorios.

La filtración por gravedad constituye el tipo más sencillo y antiguo en el que el proceso de depuración se da por decantación; durante la filtración por gravedad, los sólidos se separan por la fuerza que ejerce la presión. Los lechos filtrantes empleados a nivel piloto pueden estar conformados por arenas, gravas, gravillas u otros materiales porosos como el coque y el carbón activado, ubicados en bandejas perforadas. Este sistema de tratamiento se emplea en el tratamiento de altos caudales con bajos contenido de sólidos suspendidos; de allí su aplicación en el tratamiento de aguas.

3.4.1 Fuerza de filtración

La fuerza de la gravedad se usa en los grandes filtros, de lecho de arena y en las filtraciones sencillas de laboratorio. Las centrifugadoras pueden considerarse como filtros en los que la fuerza gravitatoria es sustituida por la fuerza centrífuga, muchas veces mayor que la primera. El fluido atravesará el medio filtrante sólo cuando se le aplique una fuerza, que puede ser causada por la gravedad, la centrifugación, la aplicación de una presión sobre el fluido por encima del filtro, o de un vacío debajo del mismo o por una combinación de estas dos cosas. El líquido es obligado por la fuerza centrífuga a pasar a través de las paredes de un tambor giratorio (rotor) finamente agujereadas y tapizadas muy a menudo con una tela filtrante.

3.4.2 Filtros de presión o de vacío

Son los más usados en la industria, con preferencia a los de gravedad. La fuerza impulsora es suplida por presión o vacío y es muchas veces mayor que la de la gravedad, lo que permite más altos rendimientos de filtración. El tipo más común de filtros de presión es el filtro prensa, del que hay diferentes tipos. Dispone de una elevada superficie filtrante en poco espacio, por lo que su eficacia es muy grande.

3.4.3. Medios filtrantes

Se pueden dividir en dos grupos:

- ♦ Los que actúan formando una barrera delgada que permite el paso sólo del fluido y no de las partículas sólidas en suspensión en él.
- ♦ Los que actúan formando una barrera gruesa al paso del fluido.

Entre los primeros, se encuentran los filtros de tela, los de criba y el papel de filtro común de los laboratorios; el segundo grupo incluye los filtros de lecho de arena, los de cama de coque, de cerámica porosa, metal poroso y los de precapa, empleados en ciertas filtraciones industriales que contienen precipitados gelatinosos, y en tratamiento de agua.

Un medio filtrante delgado ofrece una barrera en la que los poros son más pequeños que las partículas en suspensión, las cuales son separadas del fluido y retenidas en el filtro. En los medios filtrantes gruesos, los poros pueden ser más gruesos que las partículas que se van a separar, las cuales pueden acompañar al fluido alguna distancia a través del medio, pero son retenidas más pronto o más tarde por el medio filtrante en los finos intersticios que existen entre las partículas que lo constituyen.

El medio filtrante con el uso se satura por lo que debe entonces lavarse periódicamente para limpiarlo y permitir que siga la filtración.

Son el elemento fundamental de la filtración y su elección debe garantizar el correcto funcionamiento del proceso de separación. Los criterios de selección incluyen:

- ◆ Resistencia química con la mezcla que se va a separar.
- ◆ Permeabilidad al fluido.
- ◆ Porosidad, capacidad de retención de sólidos.
- ◆ Fácil mantenimiento.
- ◆ Relación vida útil – costo.

Existe una gran variedad de medios filtrantes:

- ◆ Telas y fibras tejidas (naturales, sintéticas).
- ◆ Fibras no tejidas.
- ◆ Sólidos porosos o perforados (minerales).
- ◆ Membranas poliméricas o metálicas.
- ◆ Sólidos particulados (cerámicos).

Los medios porosos utilizados además de la arena -que es el más común- son la antracita, el carbón activado, la cáscara de arroz, la cáscara de coco quemada y molida y también el pelo de coco, en el caso de los filtros rápidos.

El proceso de filtración se complementa con la aireación, la cual permite aumentar el contenido de oxígeno disuelto logrando así la oxidación del hierro y el manganeso presentes en las aguas y la remoción de dióxido de carbono, metano, compuestos orgánicos volátiles (COV) y ácido sulfhídrico (H₂S).

Durante la aireación debe ponerse en contacto el agua cruda con el aire. Los sistemas de aireación más usados en plantas pequeñas son los del tipo de bandejas, en los que se distribuye el agua sobre la parte superior de una serie de bandejas, 3 o más, a través de las cuales fluye el agua por gravedad.

Para el caso particular del sistema propuesto, se trabaja con un lecho de coque, el cual soporta las EM y aumenta tanto el área de contacto como el tiempo de retención, asegurando, de esta forma,

la eficacia de los microorganismos en la reducción de la materia orgánica presente en el agua por tratar y mejora las características físico-químicas de la misma.

3.4.4 Funcionamiento y operación

El filtro de bandejas funciona por gravedad. El proceso de filtración elimina sólidos suspendidos contenidos en el agua; la aireación se hace a través de bandejas con orificios que ayudan a oxigenar el agua y a su vez tiene contacto con coque, el cual permite la remoción de algunos metales presentes en esta.

Si bien es cierto que con el sistema de filtración propuesto se midió la reducción en la cantidad de materia orgánica y sólidos suspendidos, también es posible verificar la mejora en la calidad del afluente en términos de: reducción de metales, apariencia (color), disminución de la turbiedad y aspectos microbiológicos. De igual forma, se constituye en un equipo de alto potencial de uso en proyectos de investigación futuros.

3.4.5 Protocolo de trabajo académico

Teniendo en cuenta que la unidad de estudios Calidad y tratamiento de aguas, desarrollada en el programa de Ingeniería Ambiental incluye una serie de temáticas relacionadas con los parámetros de calidad del agua de acuerdo con su uso (doméstica, industrial, agrícola) y con las operaciones de tratamiento convencionales, se propone incluir en esta, el montaje de bandejas de aireación, con el fin de optimizar la formación de los estudiantes.



APORTES

Estos resultados fortalecen a la ciencia en el área de tratamiento de aguas, como una alternativa viable para obtener su mejor calidad en proceso de potabilización y de reuso de la misma, dando origen a una innovadora técnica con un prototipo potenciado con ME que se puede construir como equipo, disminuyendo la problemática de efectividad del diagnóstico para el tratamiento de aguas. A la vez, estimula socialmente a la enseñanza académica de métodos de tratamiento, como alternativa para la aplicación de la reducción de la contaminación del agua, en lugares donde los profesionales pueden ejercer.

Este tipo de resultados o logros puede inducir a los investigadores en formación a elaborar sus proyectos de grado y realizar sus prácticas, con base en procesos innovadores, referentes a los problemas de contaminación del agua.

CONCLUSIONES

Se encontraron las condiciones óptimas para el funcionamiento de un prototipo que incremente la concentración de oxígeno a las velocidades requeridas para garantizar que este no limite la metabolización de la materia orgánica presente.

Se evidencia claramente una muy buena intervención por parte de los ME con el prototipo de bandejas de aireación, ya que tienen un buen crecimiento bajo las condiciones in Vitro, se relacionan muy bien con el amortiguador (coque), y se identifica su acción potenciadora en las características organolépticas del agua por tratar (color y olor) y la metabolización de compuestos contaminantes.

Se evidencia la efectividad del prototipo en rango aproximado del 60 al 70% para disminuir las concentraciones de DBO, DQO y SST, en los factores de la calidad de agua potable y para encontrar el reuso del agua residual doméstica en la agricultura, en la industria de enfriamiento donde ciertos parámetros permisibles se cumplen en pro de la legislación para la misma.

El diseño de un prototipo de bandejas de aireación para el tratamiento de aguas, demuestra la factibilidad en la academia, ya que ayuda a entender y a relacionar los diferentes fenómenos físicos combinados con los bioquímicos, encontrando los diferentes usos del agua después de haber pasado por este tipo de tratamiento.

El estudio en general, abre las puertas para posibles proyectos que fortalezcan la función del prototipo, en beneficio del problema de la contaminación de aguas, que a su vez induce a su tecnificación como equipo dentro del Laboratorio de Ciencias Básicas para la prestación de servicios y desarrollo de investigaciones.

BIBLIOGRAFÍA

Al-Jayyousi, O. R. (2003) Greywater reuse: towards sustainable water management, *Desalination* 156, p. 181 – 192.

Asano, T., Burton, F., Leverenz, H., Tsuchihashi, R., Tchobanoglous, G. (2007). *Water Reuse: Issues, Technologies, and Applications*. New York: Metcalf & Eddy. Editorial McGraw-Hill..

Christova-Boala, D., Edenb, R. E. y Mcfarlane, S. (1995). An investigation into greywaterreuse for urban residential properties. *Desalination* 106, 391 – 397.

EQUARIS. Empresa estadounidense de tratamiento de aguas residuales. Recuperado de <http://www.equaris.com/>, 15 de enero de 2011

Eriksson, E., Andersen H. R., Madsen, T. S., Ledin, (2009). A. Greywater pollutionvariability and loadings. *Ecological engineering*, 35, 661 – 669.

Eriksson, E., Auffarth, K., Henze, M., Ledin, A. (2002). Characteristics of grey wastewater. *Urban Water*, 4, 85 – 104.

Hernández Muñoz, A. (2001). *Depuración y desinfección de aguas residuales*. Madrid: Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos (UPM). Colección Senior.

HOG. Empresa australiana de tanques para aprovechamiento de las aguas pluviales. Recuperado de <http://rainwaterhog.com/>, 14 de septiembre de 2010

Li, F., Wichmann, K., OTterpohl, R. (2009). Review of the technological approaches for greywater treatment and reuses. *Science of the Total Environment* 407, . 3439 – 3449.

Marcadiferencia. Venta de productos para la protección del medio ambiente. Recuperado de: <http://www.marcadiferencia.com/>, 20 de mayo de 2010

March, J. G., Gual, M., Orozco, F. (2004). Experiences on greywater re-use for toilet flushing in a hotel (Mallorca Island, Spain). *Desalination*, 164, 241 – 247.

MULTICAPAS. Empresa distribuidora de tuberías para fontanería y saneamiento. Recuperado de: <http://www.multicapas.com/>, 21 de junio del 2010

Multishower. Tienda de elementos ahorradores de agua. Recuperado de <http://www.multishower.org>, 15 de junio de 2010

Nolde, E. (2006). Possibilities of rainwater utilisation in densely populated areas including precipitation runoffs from traffic surfaces. *Desalination*, 215, p. 1 – 11.

Rose, J.B., Sun, G.S., Gerba, C. P., Singlair, N.A. (1991). Quality and persistence of enteric pathogens in greywater from various household sources.,

Bibliografía complementaria

<http://www.contratos.gov.co/archivospuc1/DA/285325011/07-1>

Ecorgánicas Medellín - Microorganismos del EM

<http://www.em-la.com>

www.ecotecnologias.com.ve

http://www.inia.org.uy/publicaciones/documentos/ad/ad_497.pdf

http://www.planagro.com.uy/publicaciones/revista/R129/R_129_52.pdf

Abreviaturas

- CO₂** Dióxido de carbono
- COV** Compuestos orgánicos volátiles
- DBO** Demanda bioquímica de oxígeno
- DQO** Demanda química de oxígeno
- E** Ensayo
- EDAR**
- EMB** Eosin methil blue
- m** metros
- m²** metros cuadrados
- m³** metros cúbicos
- MBR** Membrane bioreactor
- ME** microorganismos eficientes
- mL** Mililitro
- OD** Oxígeno disuelto
- RBC** Rotating biological contactor
- RV** Rappaport vassiliadis
- SBR** Sequencing batch reactor
- SC** Selenito cistina
- SPC** Standard plate count
- SST** Sólidos suspendidos totales
- TT** Tetrionato
- UFC** Unidades formadoras de colonias
- UV** Ultravioleta

