



USO DE SISTEMAS DE FITODEPURACIÓN PARA EL TRATAMIENTO DE EFLUENTE HOSPITALARIO

14-INV-294

ÍNDICE

1. PORTADA	1
2. ÍNDICE	2
3. INTRODUCCIÓN	3
4. MARCO TEÓRICO	3
5. OBJETIVOS GENERAL Y ESPECÍFICOS	13
6. MATERIALES Y MÉTODOS	13
7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	16
8. CONCLUSIONES	16
9. CONTRIBUCIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	16
10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	16

USO DE SISTEMAS FITODEPURACIÓN PARA TRATAMIENTO DE EFLUENTE HOSPITALARIO

Peralta, Inocencia, Cardozo, César; Nakayama, Héctor; Samudio, Antonio; Benítez, Gilberto; Ávalos, Claudia; Torre de Arguello, Dora; Duré, Rubén; Mussi, Carlos; Rojas, Teresa, Elkhilili, Ryad

Universidad Nacional de Asunción – Centro Multidisciplinario de Investigaciones Tecnológicas, San Lorenzo, Paraguay

E-mail: iperalta@rec.una.py

Palabras clave: Fitorremediación, humedal construido, *Typha sp.*, efluente hospitalario

Históricamente en el Paraguay, el Lago Ypacarai representaba uno de los puntos turísticos por excelencia, tanto por sus aguas, para aplacar el calor de veraneates que provenían de diferentes puntos del país, como por el hermoso paisaje del lugar, un atractivo para los turistas extranjeros en todas las estaciones del año, sin embargo en los últimos años, los municipios en torno al Lago han perdido ese estatus, causado principalmente por la contaminación de las aguas del Lago Ypacarai, declarado oficialmente, no apto para la recreación. Esto ha acarreado una grave problemática, principalmente a las ciudades de San Bernardino y Aregua, no solamente por la peligrosidad de las aguas contaminadas, sino también por la baja demanda turística, la principal fuente de ingreso. Llegan al lago Ypacaraí aguas residuales de diferentes cauces, pasando por plantas industriales, viviendas, centros hospitalarios, contribuyendo a la contaminación y eutrofización del lago. La Universidad Nacional de Asunción, a través del CEMIT, ha participado de diferentes comisiones encargadas de resolver esta problemática. Y con el fin de atacar la principal fuente de contaminación, “la falta de gestión de aguas residuales” el CEMIT ha realizado varios ensayos piloto, de tres tipos de humedales: humedal construido de flujo sub-superficial, estanque de tratamiento de efluentes con plantas fitorremediadoras en sistema de flotación y sistema de islas de *Typha domingensis* en el Lago Ypacarai. Estos proyectos tienen como eje a la biorremediación, que consiste principalmente en el uso de diferentes organismos (plantas, levaduras, hongos, bacterias, etc.) del medio para neutralizar sustancias tóxicas, bien transformándolas en sustancias de carácter menos tóxicas o bien convirtiéndolas en inocuas para el medio ambiente y la salud humana. Estos sistemas comparativamente con otros, tiene ciertas ventajas como ser menos costosos, tiene un impacto menor en el medio por la utilización de plantas autóctonas del lugar y pueden ser complementarios a otros sistemas. Los resultados obtenidos, de los tres tipos de ensayos piloto, en los diferentes parámetros de indicadores de contaminación, como DQO, DBO, nitrógenos totales, fósforos totales, indican la viabilidad de la utilización de esta tecnología para el tratamiento de aguas residuales, previendo la optimización del diseño adecuado para los fines de cada lugar.

El Lago Ypacaraí

Es el mayor lago de la República del Paraguay siendo uno de los destinos turísticos más populares de su capital, Asunción. Además, a su alrededor, hay áreas de producción ganadera y agrícola y una importante actividad industrial. El crecimiento demográfico y el desarrollo económico de la región en las últimas décadas han tenido gran impacto en el lago. Los residuos, domésticos e industriales, a este lago se han incrementado hasta el punto de haberse visto elevados sus niveles de nitrógeno y fósforo y sufrido una drástica caída en los niveles de oxígeno disuelto, provocando una disminución de la calidad del agua y haciendo al lago no apto para determinados usos que tiene actualmente. Además, la gran cantidad de

residuos humanos que llegan al lago a través de sus arroyos, han nutrido y fomentado la aparición masiva de cianobacterias, dando un color verde al antiguamente llamado “Lago Azul”.⁽¹⁾

Para la recuperación del estado natural del lago, se han llevado a cabo distintos proyectos de mediciones de calidad del agua.

El Lago Ypacaraí es un manantial cercado por una rica naturaleza, ubicado a 30 km. de la capital, Asunción. Es uno de los iconos del Paraguay y durante años ha representado uno de los recursos principales y destino turístico del país. Durante la temporada de verano se estima que alrededor de un millón de personas visitan la zona del lago con fines recreativos y de baño. Las aguas son también usadas por la ciudad de San Bernardino como fuente de abastecimiento de agua para uso doméstico. La toma de agua de la Planta de Tratamiento se encuentra cerca de la playa Rotonda, al Oeste del centro de San Bernardino sirviendo a una población de 24.000 habitantes, llegando a ser de hasta 400.000 habitantes en temporada turística. La cuenca del lago Ypacaraí abarca 21 distritos y 3 departamentos, forma parte de la cuenca del río Salado, el cual desemboca en el río Paraguay, cuya cuenca es una de las sub cuencas del sistema Cuenca del Plata.⁽¹⁾

El área total de la Cuenca del Lago Ypacaraí es de aprox. 1.103 km². Se trata de un lago poco profundo de unos 2 metros de profundidad de valor promedio y un valor máximo de 4 metros. Tiene un perímetro de 42,3 km y una superficie del espejo de agua de 60,9 km².

En las últimas décadas se ha producido un gran aumento demográfico en la cuenca hidrográfica del lago Ypacaraí. Se encuentra actualmente superior al millón y medio de personas y con una tasa de crecimiento del 10% anual. Más del 80% de la población se concentra en la cuenca del arroyo Yukyry.

Hay 2 grandes sub cuencas vertientes al lago que, entre ambas, abarcan el 75% de la superficie del lago y el 85% del aporte hídrico en un año hidrológico normal.

1. Cuenca del arroyo Yuquyry. Drena el sector noroeste en dirección este. Cubre los distritos de San Lorenzo (parcial), Capatá, Itauguá, Areguá y Luque.
2. Cuenca del arroyo Pirayú. Drena desde el suroeste en dirección noroeste. Abarca los distritos Ypacaraí, Pirayú y Paraguari.

La alimentación del lago y atendiendo a la situación de los afluentes del lago de las sub-cuencas del este y del oeste, con cursos que no llegan al mismo sino en épocas de lluvia, se estima que la alimentación del lago se realiza actualmente por las sub-cuencas del Pirayú y del Yukyry.

Humedales

El humedal del Pirayú, cubre un área permanentemente inundada de alrededor de 1,8 km² y se halla en la zona de la desembocadura del arroyo del mismo nombre, con las características citadas más arriba; actualmente funciona como un freno al flujo del río por la aparente concentración de sedimentos; el área de tierras inundables es de unos 12 km².

Humedal Yuquyry-Salado: En la zona más baja del arroyo Yukyry se extiende un área baja pantanosa y que cumple un papel regulador del nivel de agua del lago y preserva en cierto modo la calidad de agua. Se estima que el área inundada permanente es de 15,7 km², aunque la inundable es bastante mayor.

Se observa también una retracción del humedal acortándose su radio. Actualmente mucha superficie de terreno inundable de esta cuenca está seca, con suelos cuarteados, debido a la pérdida de agua del lago Ypacaraí atribuida a la destrucción del dique natural en la naciente del río Salado.

Parece ser que ambos humedales fueron sustancialmente afectados, para eventuales eufemísticas “recuperaciones” inmobiliarias de sus tierras, por acciones de drenaje en los mismos.

Escurrimiento del Lago

Ha habido pérdida, por escurrimiento al río Paraguay, de significativos volúmenes de agua del lago Ypacaraí, atribuida por los pobladores y turistas de entonces, a la destrucción de origen antrópico del dique natural en la embocadura/naciente del río Salado ocurrida en el verano de 1925/1926. Esto indujo una bajante importante del lago coincidente con otra pronunciada del río Paraguay que estimuló probablemente, el descenso de las aguas de aquel; a partir de ello, según percepción de aquellos usuarios, se fue produciendo el deterioro de los aspectos estéticos y de su uso para recreación, así como la disminución de sus condiciones de navegabilidad. Por otro lado, la recarga del Lago por las aguas de crecidas del río Paraguay podría haberse visto facilitada, con el concomitante eventual depósito de material aluvial y entrada de peces alóctonos.⁽²⁾

En el marco climático La cuenca del lago Ypacaraí es una zona de abundantes precipitaciones, especialmente entre la primavera y el otoño, teniendo la temporada invernal (meses de julio y agosto) como la más seca, al coincidir con la llegada de masas de aire polar. Toda la región está caracterizada por una considerable precipitación anual media, entorno a los 1500mm, teniendo su máximo histórico en 1998 con 2330mm. En la última década del siglo XX se ha observado un incremento de las precipitaciones.

Las áreas agrícolas, hortícolas y de pastoreo cubren alrededor del 29% de la superficie de la cuenca hidrográfica aguas arriba del lago, estando presentes sobretodo en la subcuenca Oeste (41%) y en la subcuenca del Pirayú (37%)

En cuanto a las actividades ganaderas, el número de animales están estimados por municipio y, al no estar ningún municipio 100% en la cuenca, se ha hecho una relación en cuanto al porcentaje que ocupan en la cuenca cada municipio, suponiendo una distribución homogénea.

Problemática de la contaminación de recursos hídricos

Los principales problemas identificados en la cuenca y que se deben mejorar son:

- Menos del 5% de la población en los municipios de la cuenca del lago cuenta con sistemas de tratamiento de aguas residuales ni sistemas de alcantarillados
- Se produce un gran vertido de aguas residuales por gran parte de las industrias
- Prácticas de ganadería intensiva en las sub-cuencas que drenan al lago además de un uso de fertilizantes ricos en nitrógeno y fósforo en los terrenos agrícolas.
- Los cambios en el uso del suelo que ha sufrido la cuenca han incrementado los fenómenos de erosión y el consecuente arrastre de sedimentos.
- Progresivo deterioro de los humedales naturales (canales de drenaje y fuegos) que disminuye su capacidad depurativa
- Estado de hipereutrofia de las aguas del lago. Genera un problema potencial de salud pública que a su vez ha tenido y tendrá implicaciones sociales y económicas para la población de la cuenca.

El lago presenta una abundante floración de cianobacterias fitoplanctónicas debido al gran incremento de las cargas de nutrientes al lago, sobre todo Nitrógeno y Fósforo. También es debido al aumento de temperatura que está sufriendo el lago tal y como hemos visto anteriormente. En la tabla se muestra el alarmante estado del lago, encontrándose en la mayoría de los distintos tipos de mediciones que se han realizado, en estado hipertrófico, el mayor estado trófico posible.⁽³⁾

- TP: Medición del estado trófico mediante la concentración de fósforo total.

- Chl-a: Medición del estado trófico por el cálculo de clorofila en el lago.
- Secchi disk: Medición del estado trófico utilizando un disco Secchi, instrumento de medición de la penetración de luminosidad (turbidez).

	TP (mg/l)	Chl-a (µg/l)		Secchi disk (m)	
Estado trófico	promedio	Promedio	Máx.	Promedio	Máx.
Ultra-oligotrófico	0,004	1,0	2,5	12,0	6,0
Oligotrófico	0,01	2,5	8,0	6,0	3,0
Mesotrófico	0,01-0,035	2,5-8	8-25	6-3	3-1,5
Eutrófico	0,035-0,1	8-25	25-75	3-1,5	1,5-0,7
Hipertrófico	>0,1	>75		<0,7	
Lago Ypacaraí Diciembre 2014- Abril 2015 (ITAIPIÚ)	0,32 Hipertrófico	4 Mesotrófico	11,5 Mesotrófico	0,1 Hipertrófico	0,2 Hipertrófico
Lago Ypacari Enero 2015- Abril 2015 (DIGESA)	0,31 Hipertrófico	15,6 Eutrófico	110 Hipertrófico	-	-

Tabla: Eutrofización del lago Ypacaraí ⁽³⁾

Se observa que se encuentra poca diversidad de especies fitoplanctónicas y gran concentración de cianobacterias, debido al avanzado estado de eutrofización que permite el crecimiento solamente de los tipos de algas resistentes a condiciones selectivas.⁽⁴⁾

Microcystis aeruginosa que aparece en gran densidad en el lago es productor de hepatoxina, o sea microcistina, que posee más de 30 variedades de isómeros, siendo que el OMS (1998) estableció la concentración máxima de 1 µg/l de microcistina LR para agua de abastecimiento público, teniendo a la vista que es una característica estimulante de acción carcinogénica. La misma entidad internacional, al mismo tiempo, adoptó la densidad de células de 20.000 por ml de cianobacteria como el nivel de alerta, recomendando la realización de examen toxicológico, inclusive de análisis químico y de bioensayo con ratones de laboratorio.⁽⁴⁾

Además de la sustancia tóxica referida, *Oscillatoria* sp. y *Phormidium* sp., a su vez, son responsables de la liberación, respectivamente, de las sustancias Geosmin y MIB (2-metilisoborneol), que dan mal sabor al agua.

Cloacas Sanitarias

De acuerdo con el estudio realizado por GTZ y Alter Vida en 1999 y actualizados con los datos estadísticos del censo del 2002, la cuenca hidrográfica del Ypacaraí abarca 20 municipios, de los cuales solamente Aregua, San Bernardino, Itaugua, J. A. Saldivar e Ypacaraí están íntegramente insertos dentro de esta cuenca, con una población de 735.454 habitantes en el año 2002.

Es importante resaltar que, conforme con los datos levantados en el Plan Maestro del 1988 ya referido anteriormente, la población de esta cuenca contaba con 207.326 habitantes en aquella época, aumentando al orden de 750 000 habitantes en el año 2002. El incremento, por lo tanto, fue de más de 3,6 veces en estos últimos 13 años. Si se mantiene la misma tasa de crecimiento, podría llegar a un tamaño poblacional

de alrededor de 1.500.000 habitantes en los próximos 10 años, lo que evidentemente acompañará un aumento significativo de las cargas sanitarias.

Con relación al sistema de tratamiento de cloacas, cerca del 25% de la población de San Lorenzo es beneficiada con la red de alcantarillado y tratamiento por laguna de estabilización.

El municipio de San Bernardino dispone de red de alcantarillado para una población de 3800 habitantes residentes en las áreas urbanas, cuyas cloacas están dirigidas a la planta de la laguna de estabilización. El efluente de esta planta se vierte directamente al Arroyo Salado para evitar la polución del lago.⁽⁴⁾

Cargas Industriales

Se demuestra que conforme a los parámetros, del 24% al 42% de las cargas industriales, están siendo mitigadas gracias al sistema de tratamiento implementado en algunas industrias, aunque es necesario perfeccionar la eficiencia del tratamiento para alcanzar, por lo menos, un nivel del 80% de mitigación.⁽⁴⁾

Las mayores fuentes poluidoras industriales encontradas en esta cuenca son de mataderos, seguidas de curtimbres, aceiteras, lavanderías y otras.

Cargas Difusas

Las principales fuentes de las cargas difusas de la cuenca en estudio provienen de las áreas agrícolas que producen marcados efectos de erosión y el área urbana con el gran cumulo de cloacas sanitarias, basuras y de otros poluyentes adversos.⁽⁴⁾

La carga difusa de la cuenca del Ypacaraí fue estimada conjuntamente con la medición del caudal, mediante los datos obtenidos en los puntos de control del caudal en el Ao Yuquyry, a través de varios días de monitoreos realizados desde el mes de julio del 2005 a febrero del 2006.⁽⁴⁾

Fitorremediación

Las aguas residuales son aguas de composición variada provenientes de las descargas de usos municipales, industriales, comerciales, agrícolas, pecuarios, domésticos y de cualquier otro uso, así como la mezcla de ellas. El tratamiento de las aguas residuales es prioritario a nivel mundial, ya que se requiere disponer de agua de calidad y en cantidad suficiente para preservar la vida del planeta, además de contribuir con el ambiente, la salud y la calidad de vida.

Estas deficiencias en la infraestructura sanitaria local, traen consigo alteración de los ecosistemas costeros, riesgos a la salud, problemas estéticos, sanitarios y ambientales^(5,11)

La fitorremediación es una alternativa de tratamiento económica para aguas residuales en cuanto a operación y mantenimiento, ya que no requiere de energía, es amigable con el ambiente y eficiente para reducir la carga contaminante de las aguas residuales a niveles bajos, para así cumplir con las exigencias de las normas ambientales.

De manera más completa, la fitorremediación puede definirse como una tecnología sustentable que se basa en el uso de plantas para reducir in situ la concentración o peligrosidad de contaminantes orgánicos e inorgánicos de suelos, sedimentos, agua, y aire, a partir de procesos bioquímicos realizados por las plantas y microorganismos asociados a su sistema de raíz que conducen a la reducción, mineralización, degradación, volatilización y estabilización de los diversos tipos de contaminantes.⁽⁵⁾

Fitoextracción o fitoacumulación: en esta estrategia se explota la capacidad de algunas plantas para acumular contaminantes en sus raíces, tallos o follaje, las cuales pueden ser fácilmente cosechadas. Los

contaminantes extraídos son principalmente metales pesados, aunque también puede extraerse cierto tipo de contaminantes orgánicos y elementos e isótopos radiactivos. Generalmente los sistemas de fitoextracción se implementan para extraer metales de suelos contaminados, por medio de plantas conocidas como metalofitas, es decir acumuladoras de metales; sin embargo, también pueden implementarse para tratar aguas residuales.⁽⁵⁾

Los primeros sistemas de tratamiento de aguas residuales a base de plantas se implementaron en los países europeos a principios de 1960, utilizando juncos o carrizos. Desde entonces, los sistemas de fitorremediación acuática se han perfeccionado y diversificado, y su aceptación y aplicación cada vez es mayor. La fitorremediación acuática tiene la ventaja de que se pueden remover, *in situ*, diferentes tipos de metales que se hallen con bajas concentraciones en grandes volúmenes de agua.⁽⁵⁾

Los sistemas de fitorremediación acuática pueden ser de cuatro tipos:

1. *Humedales construidos*: se definen como un complejo de sustratos saturados, vegetación emergente y sub-emergente. Animales y agua que simula los humedales naturales, diseñado y hecho por el hombre para su beneficio.
2. *Sistema de tratamiento con plantas acuáticas flotantes*: pueden ser estanques semiconstruidos o naturales, donde se mantienen plantas flotantes para tratar aguas residuales.
3. *Sistema de tratamiento integral*: es una combinación de los dos sistemas anteriores.
4. *Sistema de rizofiltración*, ya mencionado anteriormente.⁽⁵⁾

Se ha demostrado que estos sistemas pueden remover eficientemente fosfatos, nitratos, fenoles, pesticidas, metales pesados, elementos radiactivos, fluoruros, bacterias y virus, de aguas residuales municipales, agrícolas e industriales, incluyendo las industrias: lechera, de pulpa y papel, textil, azucarera, de curtiduría, de destilería, aceitera, de galvanizado y metalurgia.

Tipos de plantas acuáticas

Con base en sus formas de vida, las plantas utilizadas en los sistemas de fitorremediación acuática se clasifican en tres grupos:

Emergentes: la raíz de estas plantas está enterrada en los sedimentos y su parte superior se extiende hacia arriba de la superficie de agua. Sus estructuras reproductoras están en la porción aérea de la planta. Ejemplos: carrizo (*Phragmites communis*), platanillo (*Sagitaria latifolia*) y tule (*Thypa domingensis*).⁽⁵⁾

Flotantes: se subdividen en dos grupos:

a) *Plantas de libre flotación (no fijas)*: sus tallos y hojas se desarrollan sobre la superficie del agua. Sin embargo, sus raíces no están fijas en ningún sustrato y cuelgan en la columna de agua. Sus estructuras vegetativas y reproductivas se mantienen emergentes. Ejemplos: lirio acuático (*Eichhornia crassipes*), lenteja de agua (*Lemna* spp. y *Salvinia minima*).⁽⁵⁾

b) *Plantas de hoja flotante (fijas)*: tienen sus hojas flotando sobre la superficie del agua, pero sus raíces están fijas en los sedimentos. Ejemplo: nenúfares (*Nymphaea elegans* y *Nymphoides fallax*).⁽⁵⁾

c) *Sumergidas*: se desarrollan debajo de la superficie del agua o completamente sumergidas. Sus órganos reproductores pueden presentarse sumergidos, emerger o quedar por encima de la superficie de agua. Ejemplos: bejuquillo (*Cerathophyllum demersum*), hidrilla o maleza (*Hydrilla verticillata*) y pastos (*Phyllospadix torreyi*).⁽⁵⁾

Criterios de selección de plantas para la fitorremediación

La eficiencia de remoción de contaminantes durante el proceso de fitorremediación dependerá principalmente de la especie de planta utilizada, el estado de crecimiento de las plantas, su estacionalidad y el tipo de metal a remover. Por lo mismo, para lograr buenos resultados, las plantas a utilizar deben tener las siguientes características:

- Ser tolerantes a altas concentraciones de metales.
- Ser acumuladoras de metales.
- Tener una rápida tasa de crecimiento y alta productividad.
- Ser especies locales, representativas de la comunidad natural.
- Ser fácilmente cosechables.

Uno de los principales procesos que ocurren en el tratamiento de aguas residuales, es la degradación de la materia orgánica que llevan a cabo los microorganismos que viven sobre y alrededor de las raíces de las plantas. Los productos de degradación son absorbidos por las plantas junto con nitrógeno, fósforo y otros minerales. A su vez, los microorganismos usan como fuente alimenticia parte o todos los metabolitos desechados por las plantas a través de su raíz. Otro fenómeno importante es el relacionado con la atracción electrostática entre las cargas eléctricas de las raíces de las plantas con las cargas opuestas de partículas coloidales suspendidas, las cuales se adhieren a la superficie de la raíz y posteriormente son absorbidas y asimiladas por las plantas y los microorganismos. Además, las plantas tienen la capacidad de transferir oxígeno desde sus partes superiores hasta su raíz, produciendo una zona aeróbica en sus alrededores que favorece los distintos procesos que ocurren durante el tratamiento de aguas residuales domésticas.

Como se ha mencionado, las raíces de las plantas sirven primeramente como sustrato para la comunidad microbiana, cuya actividad reduce significativamente el contenido de sólidos suspendidos, los niveles de nitrógeno y el consumo de oxígeno. Posteriormente, las propias plantas, a través de sus actividades metabólicas, se encargan de asimilar, transformar y acumular los diferentes tipos de contaminantes.

Calidad de Aguas y Recursos Hídricos

La calidad del agua es un factor determinante para su uso. Por ello, la calidad que debe tener cada tramo de río o acuífero debe ser de adecuada para el uso a que ese recurso hídrico en concreto es destinado. Esta calidad se puede conseguir al evitar que a los acuífero y ríos se viertan cargas contaminantes superiores a lo que estos no puedan auto depurarse de forma natural. Por ello, se debe evitar, en el caso de los ríos, los vertidos directo o indirectos de efluentes no depurados y, en el de los acuíferos, las actuaciones incontroladas que produzcan infiltración de lixiviados contaminantes. Los principales problemas de degradación de la calidad natural se deben fundamentalmente a la contaminación por vertidos domésticos, e industriales y a prácticas agrícolas poco adecuados.⁽⁶⁾

La Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico (OCDE, 2003) define un indicador como “un parámetro o un valor derivado de parámetros, que sugiere, proporciona información acerca de, o describe el estado de un fenómeno, el medio ambiente o un área, con un significado que se extiende más allá de que estén directamente vinculados con el valor de un parámetro”..

El determinar la calidad del agua disponible es un requisito indispensable ante la función de suministrar el agua para consumo humano y abrevado de animales, el riego, la industria, fines recreativos o para la vida acuática. El estado de conservación de los recursos hídricos refleja el cuidado y preocupación tanto por el ambiente físico, como por el hombre y sus actividades en el largo plazo. La administración sustentable de nuestros recursos hídricos está por lo tanto íntimamente unida con la habilidad de garantizar tanto su cantidad y su calidad física, química y biológica.⁽⁶⁾

La calidad del agua establece un conjunto de condiciones, entendidas como los niveles aceptables que deben cumplirse para asegurar la protección del recurso hídrico y la salud de la población en un territorio dado.

Estos parámetros de calidad se fijan de manera diferenciada, de conformidad con los diversos usos a los que se va a destinar el recurso (consumo humano, riego, industria, ganadería, recreación, vida acuática, etc.).

Parámetros de la Calidad de Agua

La manera más sencilla y práctica de estimar la calidad del agua consiste en la definición de índices o relaciones de las medidas de determinados parámetros físicos, químicos o biológicos en la situación real y en otra situación que se considere admisible o deseable y que se encuentra definida por ciertos estándares o criterios. El cálculo de los límites permite llegar a diferentes clasificaciones de calidad de agua de acuerdo al uso específico al que se le destine.

Parámetros Físicos

No son índices absolutos de contaminación, por lo que en cada caso debe medirse la desviación de la norma. Los parámetros físicos más importantes son:

- Transparencia
- Temperatura
- Turbidez
- Color
- Olor
- Sabor
- Temperatura
- Conductividad eléctrica
- pH

Parámetros Biológicos

Se refiere a la presencia de microorganismos patógenos de diferentes tipos: bacterias, virus, protozoos y otros organismos que transmiten enfermedades como el cólera, tifus, gastroenteritis diversas, hepatitis, etc. En los países en vías de desarrollo las enfermedades producidas por estos patógenos son uno de los motivos más importantes de muerte prematura, sobre todo de niños.

Normalmente estos microorganismos llegan al agua en las heces y otros restos orgánicos que producen las personas y animales. Por esto, un buen índice para medir la salubridad de las aguas, en lo que se refiere a estos microorganismos, es el número de bacterias coliformes presentes en el agua.

Los parámetros microbiológicos más comunes son:

- Coliformes totales
- *Escherichia coli* fecales
- Coliformes fecales

Parámetros Químicos

Son los más importantes para definir la calidad del agua. Si el agua en estudio no ha recibido vertidos urbanos o industriales, la prospección debe comprender la determinación de los siguientes parámetros:

- Iones más importantes (bicarbonatos, cloruros, sulfatos, calcio, magnesio y sodio)
- Oxígeno disuelto, demanda bioquímica de oxígeno, Carbono orgánico

Si es necesario realizar un estudio más detallado pueden irse incorporando otros grupos de parámetros químicos:

- Compuestos de nitrógenos, fosfatos, hierro, demanda bioquímica de oxígeno
- Fenoles, derivados del petróleo, detergentes, pesticidas
- Fósforo orgánico e inorgánico, metales pesados, fluoruros

Al preparar estas prospecciones se debe tener en cuenta los factores naturales que influyen en la composición química del agua, y la cantidad, localización y tipo de asentamientos urbanos, industrias y de la presencia de actividades agropecuarias.

Las consideraciones previas se refieren a estudios específicos de calidad del agua. Cuando la calidad del agua se contempla dentro de un estudio general del medio físico, las exigencias son menores, los parámetros más frecuentemente usados son:

- Oxígeno disuelto y demanda bioquímica de oxígeno
- Sólidos disueltos y en suspensión
- Compuestos de nitrógenos, fósforo, azufre y cloro
- pH
- Dureza
- Turbidez
- Elementos tóxicos
- Elementos patógenos

En relación a los usos del agua, los parámetros típicos determinantes en cada caso son:

- Uso doméstico: turbidez, sólidos disueltos, tóxicos, Coliformes
- Uso industrial: sólidos disueltos y en suspensión
- Riego: sólidos disueltos, contenido de sodio
- Bebida para ganado: libre de parásitos y patógenos
- Recreo: turbidez, tóxicos, Coliformes
- Vida acuática: Oxígeno disuelto, compuestos organoclorados.

Microorganismos y bioindicadores de contaminación en recursos hídricos

La eutrofización es un proceso natural en los ecosistemas acuáticos, producido por el enriquecimiento del cuerpo de agua con nutrientes, durante los últimos 200 años el hombre ha acelerado estos procesos de eutrofización modificando tanto la calidad de las aguas, como la estructura de las comunidades biológicas debido al aumento en la carga orgánica e inorgánica de los cuerpos de agua. La eutrofización reduce considerablemente los usos potenciales que tienen los recursos hídricos puesto que induce a la mortalidad de especies animales, la descomposición del agua y el crecimiento de microorganismos (bacterias). Además, en muchas ocasiones los microorganismos se convierten en un riesgo para la salud humana, como es el caso de los agentes patógenos transmitidos por el agua, que constituyen un problema de salud mundial. La contaminación fecal de las aguas superficiales que sirven como fuente de abastecimiento es uno de los problemas más preocupantes en los países en vías de desarrollo, esta contaminación se debe al vertimiento de los desagües sin ningún tratamiento, hecho que es usual en las grandes ciudades. En las zonas rurales la contaminación se origina en la defecación a campo abierto y a la presencia de animales domésticos y silvestres que actúan como reservorios de agentes patógenos.⁽⁷⁾

No obstante, existe una gran dificultad para determinar la presencia de todos los microorganismos patógenos implicados en los procesos de contaminación ambiental, Los microorganismos indicadores son aquellos que tienen un comportamiento similar a los patógenos, concentración y reacción frente a factores

ambientales, pero son más fáciles, rápidos y económicos de identificar. Una vez se ha demostrado la presencia de grupos indicadores, se puede inferir que los patógenos se encuentran presentes en la misma concentración y que su comportamiento frente a diferentes factores como pH, temperatura, presencia de nutrientes, tiempo de retención hidráulica o sistemas de desinfección es similar a la del indicador.

Un microorganismo indicador de contaminación fecal debe reunir las siguientes características:

- Ser un constituyente normal de la flora intestinal de individuos sanos.
- Estar presente, de forma exclusiva, en las heces de animales homeotérmicos.
- Estar presente cuando los microorganismos patógenos intestinales lo están.
- Presentarse en número elevado, facilitando su aislamiento e identificación.
- Debe ser incapaz de reproducirse fuera del intestino de los animales homeotérmicos.
- Su tiempo de supervivencia debe ser igual o un poco superior al de las bacterias patógenas, su resistencia a los factores ambientales debe ser igual o superior al de los patógenos de origen fecal.
- Debe ser fácil de aislar y cuantificar.
- No debe ser patógeno.

Los microorganismos que conforman el grupo de los coliformes totales; *Escherichia*, *Enterobacter*, *Klebsiella*, *Serratia*, *Edwardsiella* y *Citrobacter*, viven como saprófitos independientes o como bacterias intestinales; los coliformes fecales (*Escherichia*) son de origen intestinal. Todos pertenecen a la familia *Enterobacteriaceae*, son bacilos Gram negativos, anaerobios facultativos, no esporulantes, fermentadores de lactosa con producción de gas; constituyen aproximadamente el 10% de los microorganismos intestinales de los seres humanos y otros animales.⁽⁷⁾

La presencia de coliformes totales debe interpretarse de acuerdo con el tipo de aguas: deben estar ausentes en 85% de las muestras de aguas potables tratadas. En caso de estar presentes, su número no puede ser superior a 2-3 coliformes. Esta contaminación a pesar de ser baja, no puede ocurrir en tres muestras recolectadas en días consecutivos. En aguas tratadas, los coliformes totales funcionan como un alerta de que ocurrió contaminación, sin identificar el origen. Indican que hubo fallas en el tratamiento, en la distribución o en las propias fuentes domiciliarias. Su presencia acciona los mecanismos de control de calidad y de procesamiento dentro de la planta de tratamiento de agua, e intensifica la vigilancia en la red de distribución.⁽⁷⁾

Desafíos en la problemática del tratamiento de aguas negras

La población urbana creció a un ritmo vertiginoso". Pasó de 64 millones en 1950, a 384 millones en el 2000, y 458 millones en el 2010. El crecimiento disparó también la demanda de servicios vinculados al agua, tales como agua potable, alcantarillado, tratamiento de aguas residuales, drenaje urbano y control de inundaciones.

En relación al agua, durante este mismo período, los países han tratado de responder al crecimiento de sus ciudades, asignando prioridad a la extensión de las redes de agua y alcantarillado sanitario para atender a los nuevos habitantes urbanos

Simultáneamente, otros elementos de la infraestructura hídrica urbana han quedado rezagados, como son el drenaje pluvial, el tratamiento de las aguas servidas y los sistemas troncales de conducción de agua potable y cloacas. Al mismo tiempo, se registra una fuerte degradación ambiental de los ríos, lagos, y acuíferos urbanos, la cual se asume como otro reto primordial para preservar la calidad de las fuentes de agua de las ciudades.

Si bien varios factores desencadenaron durante décadas la contaminación casi irreversible de nuestros recursos hídricos, la instalación de plantas de tratamiento de aguas residuales podría hacer una gran

diferencia a futuro. Hoy, hasta el consumo de agua potable puede verse afectado por la contaminación de uno de los acuíferos más importantes del país, como el acuífero Patiño.

En la mayoría de los cursos hídricos urbano, sub urbanos y rurales existe el mismo inconveniente: vertido directo de aguas cloacales. Para evitar que se sigan contaminando aún más, representantes de instituciones públicas involucradas plantean la instalación de plantas de tratamiento de aguas residuales, y la elaboración de proyectos de fitorremediación que contribuirán a que las aguas que desembocan en los cauces al menos estén en condiciones ambientalmente admisibles.

A todo esto se suman los efluentes de viviendas, industrias y centros hospitalarios, aumentando la contaminación y el proceso de eutrofización.

El presente proyecto tuvo como objetivo establecer un sistema de tratamiento de efluente con humedal construido, por Fitodepuración y evaluar su eficiencia en el tratamiento de efluente del Instituto Nacional del Cáncer de Areguá.

Materiales y métodos

Se ha diseñado un humedal construido consistente en un complejo de tres piletas, dos con islas flotantes y una tercera con sistema de flujo sub-superficial, con plantines de *Typha domingensis*, los que fueron germinados en el laboratorio de Biotecnología del CEMIT-UNA y desarrollados en un vivero en la ciudad de Itá. Para la toma de muestras, procesamiento y análisis de los parámetros fisicoquímicos y biológicos, se realizaron en base a los establecido en el Standard Methods, 21 Edición. Los análisis y los ensayos con *Typha* sp. fueron realizados en el Centro Multidisciplinario de Investigaciones Tecnológicas (CEMIT), dependiente de la Dirección General de Investigación Científica y Tecnológica (DGICT) de la Universidad Nacional de Asunción (UNA).



Plantación de plantines de totora en el sistema de flotación



Instalación de las piletas de tratamiento en el INCAN



Colocación del cercado de protección

Resultados

En relación a la pileta de tratamiento fitorremediadora (Totora), se ha logrado poner a punto el sistema de producción y multiplicación a partir de semillas botánicas. Las islas fueron instaladas en dos piletas y fueron tomadas muestras de agua semanalmente para su evaluación.

Se tiene un cronograma de tomas de muestra hasta febrero de 2021.

Basados en los resultados iniciales se puede concluir que se ha logrado poner a punto la producción y multiplicación de plantines de Totora para su uso en la implementación de humedales construidos como sistema fitodepurador.

Bibliografía

1. Facetti Masulli JF, Lozano F, Flores F. Aspectos Hidrológicos del Lago de Ypacarai: Un caso de estudio. Soc Científica del Paraguay. 2006;(August):4–8.
2. Delgado M, Lozano F, Facetti Masulli JF. Aspectos limnológicos del Lago Ypacarai estudios hídricos III. Soc Científica del Paraguay. 2014;XIX(1943):81–96.
3. Rodríguez A. Estudio de la contaminación del lago Ypacarai e introducción de un dron acuático para el monitoreo de la calidad del agua Autor. 2019.
4. José Silvero FK. Informaciones Sobre Las Actividades Humanas Que Condicionan La Calidad De Agua Del Río Paraguay, Lago Ypacarai Y Otros Afluentes. 2013.
5. López RAN, Vong YM, Borges RO, Olguín EJ. Fitorremediación fundamentos y aplicaciones. Vol. 10, Diversity. 2018. 69–83 p.
6. Gil-Marín JA, Vizacíno C, Montañó-Mata NJ. Evaluación de la calidad del agua superficial utilizando el índice de calidad del agua. An científicos UNALM. 2018;79(1):111–9.
7. Arcos M, Avila S, Estupiñan S, Gomez A. Indicadores Microbiológicos De Contaminación De Las Fuentes de agua. Nov Publicación en Ciencias Biomédicas [Internet]. 2005;3(4):69–79. Available from: <http://hemeroteca.unad.edu.co/entrenamiento/index.php/nova/article/view/338>
8. Informe DIGESA 2006. Proyecto de control y mejoramiento de la calidad de las aguas del lago. <http://chmparaguay.com.py/informaciones-ambientales/Agua/Informe%20AGUA%20JICA%20SEAM%20DIGESA.pdf>
9. Informe Sobre las actividades humanas que condicionan la calidad de agua del lago 01/2013 http://archivo.seam.gov.py/sites/default/files/informe_final_%20sobre_%20el_rio_paraguay_y_lago_ypacarai.pdf
10. Cianobacterias del lago Ypacarai. Ministerio de Salud Pública y bienestar social. Informe DIGESA 2016 <https://www.mspbs.gov.py/portal/10473/cianobacterias-del-lago-ypacarai-dentro-de-limites-establecidos.html>
11. MENDOZA GUERRA, Yoma Isabel; CASTRO ECHAVEZ, Fernando Luis; MARIN LEAL, Julio César y HEDWIG BEHLING, Elisabeth. Fitorremediación como alternativa de tratamiento para aguas residuales domésticas de la ciudad de Riohacha (Colombia). *Rev. Téc. Ing. Univ. Zulia* [online]. 2016, vol.39, n.2 [citado 2020-11-25], pp. 071-079.