

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/350648221>

Phytoremediation of arsenic-contaminated waters by artificial floating island: Literature review

Article in *Revista de la Facultad de Agronomía* · January 2021

DOI: 10.47280/RevFacAgron(LUZ).v38.n1.10

CITATIONS

0

READS

38

5 authors, including:



Kalina Marcela Fonseca Largo

Universidad Técnica de Cotopaxi (UTC)

6 PUBLICATIONS 2 CITATIONS

SEE PROFILE



Joseline Ruiz

Universidad Técnica de Cotopaxi (UTC)

17 PUBLICATIONS 71 CITATIONS

SEE PROFILE



E.A.C. Pallasco

Universidad Técnica de Cotopaxi (UTC)

1 PUBLICATION 0 CITATIONS

SEE PROFILE

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:







synthesis of new materials as mitigators of hydraric stress [View project](#)

Fitorremediación de aguas contaminadas con arsénico mediante islas flotantes artificiales: revisión bibliográfica

Phytoremediation of arsenic-contaminated waters by artificial floating island: literature review

Fitorremediação de águas contaminadas com arsênico usando ilhas flutuantes artificiais: revisão bibliográfica

Kalina Marcela Fonseca Largo^{1*}, Joseline Luisa Ruiz Depablos²,
Edgar Fabián Espitia Sarmiento³, Edward Alexander
Campana Pallasco⁴ y Evelyn Liseth Moreno Chicaiza⁵

¹Docente - Investigadora. Coordinador del grupo de investigación: Manejo del Recursos Hídricos, Universidad Técnica de Cotopaxi. Ecuador. Correo electrónico: kalina.fonseca@utc.edu.ec, . ²Investigadora. Universidad Técnica de Cotopaxi, Ecuador. Correo electrónico: joseline.ruiz9062@utc.edu.ec, . ³Director de la carrera de Ingeniería en Ciencias del Agua. Universidad Regional Amazónica Ikiam. Ecuador. Correo electrónico: edgar.espitia@ikiam.edu.ec, ⁴Egresado de la carrera de Ingeniería en Medio Ambiente de la Universidad Técnica de Cotopaxi. Correo electrónico: edward.campana6650@utc.edu.ec, . ⁵Egresada de la carrera de Ingeniería en Medio Ambiente de la Universidad Técnica de Cotopaxi. Correo electrónico: evelyn.moreno6511@utc.edu.ec, .

Resumen

El agua es el principal medio a través del cual el arsénico (As) ingresa al cuerpo humano causando daños irreversibles a la salud como envenenamiento, lesiones cutáneas y varios tipos de cánceres. Una estrategia para abordar la contaminación de As en ecosistemas acuáticos, son las islas flotantes artificiales (IFA) usando pasto Vetiver (*Chrysopogon zizanioides*). El objetivo de este estudio fue revisar 45 publicaciones sobre los fundamentos de construcción, implementación, descripción de mecanismos de descontaminación, caracterización de la especie macrófita y disposición final del material vegetal. También, se revisaron algunos modelos matemáticos que pueden ser aplicados para cuantificar las tasas de remoción

Recibido el 27-02-2020 • Aceptado el 11-10-2020.

*Autor de correspondencia. Correo electrónico: kalina.fonseca@utc.edu.ec

y eficiencia del sistema. Con base en la literatura revisada, se concluye que el pasto Vetiver es una alternativa eficaz en la remoción de As y su efecto puede ser amplificado al implementar un lecho flotante artificial. La importancia de esta relativamente nueva ecotecnología requiere que se continúen las investigaciones en el área.

Palabras claves: remoción, Vetiver, ecotecnología, material vegetal, lecho flotante.

Abstract

Water is the main way arsenic (As) can get into the human body causing irreversible health damage such as poisoning, skin lesions and various types of cancer. One strategy for addressing pollution of arsenic in aquatic ecosystems is artificial floating islands (IFA) using Vetiver grass (*Chrysopogon zizanioides*). The objective of this study was to review 45 publications on the fundamentals of construction, implementation, description of decontamination mechanisms, characterization of macrophyte species and final disposal of plant material. Also, some mathematical models that can be applied to quantify removal rates and system efficiency were reviewed. Based on the literature reviewed, it is concluded that Vetiver grass is an effective alternative in removing As and its effect can be amplified by implementing an artificial floating bed. The importance of this relatively new ecotechnology requires further research in the field.

Keywords: removal, Vetiver, ecotechnology, plant material, artificial floating bed.

Resumo

A água é o principal meio através do qual o arsênico (As) entra no corpo humano, causando danos irreversíveis à saúde, como envenenamentos, lesões na pele e vários tipos de câncer. Uma estratégia para lidar com a contaminação de arsênio em ecossistemas aquáticos são as ilhas flutuantes artificiais (IFA) usando o capim Vetiver (*Chrysopogon zizanioides*). O objetivo deste estudo foi revisar as publicações 45 sobre os fundamentos da construção, implementação, descrição dos mecanismos de descontaminação, caracterização das espécies de macrófitas e disposição final do material vegetal. Além disso, foram revisados alguns modelos matemáticos que podem ser aplicados para quantificar as taxas de remoção e a eficiência do sistema. Com base na literatura revisada, conclui-se que a grama Vetiver é uma alternativa eficaz na remoção de As e seu efeito pode ser amplificado através da implementação de um leito flutuante artificial. A importância desta tecnologia ecológica relativamente nova exige que se prossiga a investigação na área.

Palavras-chave: remoção, Vetiver, tecnologia ecológica, material vegetal, leito flutuante.

Introducción

La presencia de elevadas concentraciones de arsénico (As) en la hidrósfera, litósfera y atmósfera, es ocasionada por procesos naturales y antropogénicos (Shukla y Srivastava, 2017; Dinwiddie y Liu, 2018; Pincetti-Zúniga *et al.*, 2020). La principal actividad humana que genera altos niveles de As en los ecosistemas es la pirometalurgia de minerales no ferrosos (Cu, Pb, Zn, Ni, Sn) (Li *et al.*, 2020; Rong *et al.*, 2020), que genera efluentes con As y ácido sulfúrico (H_2SO_4). Además, el uso de pesticidas y herbicidas compuestos de metilados como el ácido monometilarsónico (MMA), ácido dimetilarsínico (DMA), el óxido de trimetilarsina (TMAO) (Shukla y Srivastava, 2017) y fertilizantes químicos generan As que son dispuestos en el suelo y agua (He *et al.*, 2020). Como fuente de contaminación natural, el As surge por procesos naturales como meteorización, actividad biológica y emisiones volcánicas (Reddy y DeLaune, 2008; Morales-Simfors *et al.*, 2019).

La toxicidad del As se relaciona con su solubilidad (Rong *et al.*, 2020), por esa razón, los humanos están expuestos principalmente por la presencia en alimentos y agua (Shukla y Srivastava, 2017; Pincetti-Zúniga *et al.*, 2020). La ingestión de As inorgánico a través del agua puede tener efectos adversos para la salud. La Organización Mundial de la Salud (OMS) ha establecido como valor de referencia de $10 \mu g \cdot L^{-1}$, pero muchos países aún no han adoptado esta

Introduction

The presence of high concentrations of arsenic (As) in the hydrosphere, lithosphere and atmosphere is caused by natural and anthropogenic processes (Shukla and Srivastava, 2017; Dinwiddie and Liu, 2018; Pincetti-Zúniga *et al.*, 2020). The main human activity that generates high levels of As in ecosystems is the pyrometallurgy of non-ferrous minerals (Cu, Pb, Zn, Ni, Sn) (Li *et al.*, 2020; Rong *et al.*, 2020), which generates effluents with As and sulfuric acid (H_2SO_4). In addition, the use of pesticides and herbicides composed of methylates such as monomethylarsonic acid (MMA), dimethylarsinic acid (DMA), trimethylarsine oxide (TMAO) (Shukla and Srivastava, 2017) and chemical fertilizers generate As that are disposed in the soil and water (He *et al.*, 2020). As a source of natural pollution, As arises from natural processes such as weathering, biological activity, and volcanic emissions (Reddy and DeLaune, 2008; Morales-Simfors *et al.*, 2019).

The toxicity of As is related to its solubility (Rong *et al.*, 2020), for that reason, humans are exposed mainly by its presence in food and water (Shukla and Srivastava, 2017; Pincetti-Zúniga *et al.*, 2020). Ingestion of inorganic As through water can have adverse health effects. The World Health Organization (WHO) has established a reference value of $10 \mu g \cdot L^{-1}$, but many countries have not yet adopted this standard in their legislation (Ning, 2005). At the global

norma en su legislación (Ning, 2005). A nivel mundial, se han propuesto varios métodos tradicionales para la eliminación de As (Zhao *et al.*, 2010) particularmente inorgánico arsenic (Asi, sin embargo, los costos de estas tecnologías dificultan su aplicación en países en vía de desarrollo. Por otra parte, existen métodos de biorremediación, que a diferencia de los métodos físicoquímicos son adecuados para extensas áreas contaminadas, requieren bajos costos de instalación y mantenimiento (Pilon-Smits, 2005). El costo total estimado de biorremediación puede llegar hasta el 5 % de otros métodos tradicionales disponibles (Prasad, 2003). El éxito de la biorremediación, en el caso de la fitorremediación, depende de las especies vegetales utilizadas en los sistemas de depuración. En las últimas décadas, varios estudios sobre las características fisiológicas del pasto Vetiver (*Chrysopogon zizanioides* (L.) Roberty) han demostrado que es un excelente candidato para ser aplicado en un amplio rango de necesidades de fitoremediación (Shu y Xia, 2003) which frequently contain excessive concentrations of heavy metals. (IVT. A través de diversos mecanismos, *C. zizanioides* es capaz de adaptarse a las condiciones de los humedales y acumular metales pesados en las raíces (Siyar *et al.*, 2020) y translocar mínimas cantidades a los brotes (Wang *et al.*, 2010).

La remoción de metales pesados con este pasto proporciona un tratamiento eficaz; sin embargo, su efecto puede ser amplificado al implementar un

level, several traditional methods have been proposed for the removal of As (Zhao *et al.*, 2010), however, the costs of these technologies make it difficult to apply them in developing countries. On the other hand, there are bioremediation methods, which unlike physicochemical methods are suitable for large contaminated areas, require low installation and maintenance costs (Pilon-Smits, 2005). The total estimated cost of bioremediation can be up to 5 % of other available traditional methods (Prasad, 2003). The success of bioremediation, in the case of phytoremediation, depends on the plant species used in the purification systems. In the last decades, several studies on the physiological characteristics of Vetiver grass (*Chrysopogon zizanioides* (L.) Roberty) have shown that it is an excellent candidate to be applied in a wide range of phytoremediation needs (Shu and Xia, 2003). Through various mechanisms, *C. zizanioides* is able to adapt to wetland conditions and accumulate heavy metals in the roots (Siyar *et al.*, 2020) and translocate minute amounts to the shoots (Wang *et al.*, 2010).

The removal of heavy metals with this grass provides an effective treatment; however, its effect can be amplified by implementing an artificial floating bed (Samal, 2019). Artificial floating islands (IFA), also known as floating wetlands, restore polluted aquatic ecosystems with a good cost-efficiency ratio. The use of this ecotechnology is a promising strategy for the removal of As (Ismail *et al.*, 2014; Smolcz *et al.*, 2015; Lara

lecho flotante artificial (Samal, 2019). Las islas flotantes artificiales (IFA) conocidas también como humedales flotantes, restauran ecosistemas acuáticos contaminados con una buena relación costo-eficiencia. El uso de esta ecotecnología, es una estrategia prometedora para la remoción de As (Ismail *et al.*, 2014; Smolcz *et al.*, 2015; Lara y Navarro, 2017; Singh, 2017; Colares *et al.*, 2020) La presente revisión plantea los fundamentos de la construcción, implementación, descripción de los mecanismos de descontaminación, caracterización de la especie macrófita, disposición final de los residuos vegetales y los modelos matemáticos para analizar procesos de biosorción de As con pasto Vetiver

Métodos

La mayoría de los estudios referentes a las IFA se publicaron en inglés (98,9 %) y los dos países que presentan el mayor número de investigaciones son Estados Unidos de América (EE.UU.) y China, que en conjunto representan más del 52 % de todas las publicaciones divulgadas desde 1992 hasta el 2019 (Colares *et al.*, 2020) En esta revisión bibliográfica se procedió a la búsqueda de artículos científicos en las principales bases de datos en el área de fitorremediación de agua contaminada con arsénico. Las bases de datos utilizadas fueron: Scopus, ScienceDirect, SpringerLink, SciELO (Scientific Electronic Library Online) y Web of Science. En la estrategia de indagación se utilizaron combinaciones de los siguientes términos:

and Navarro, 2017; Singh, 2017; Colares *et al.*, 2020). The present review raises the fundamentals of the construction, implementation, description of the decontamination mechanisms, characterization of the macrophyte species, final disposal of plant residues and mathematical models to analyze biosorption processes of As with Vetiver grass.

Methods

Most of the studies referring to IFA were published in English (98.9 %) and the two countries with the highest number of investigations are the United States of America (USA) and China, which together represent more than 52 % of all publications released from 1992 to 2019 (Colares *et al.*, 2020). In this review, we proceeded to search for scientific articles in the main databases in the area of phytoremediation of water contaminated with arsenic. The databases used were: Scopus, ScienceDirect, SpringerLink, SciELO (Scientific Electronic Library Online) and Web of Science. In the research strategy, combinations of the following terms were used: floating treatment wetlands, *C. zizanioides*, ecotechnology, water quality improvement, artificial floating islands, heavy metal removal from bodies of water, removing arsenic, phytoremediation polluted water arsenic, mathematical models arsenic removal.

Those articles published between the years 2000 and 2020 that included studies on the phytoremediation capacity of Vetiver grass in water

Se seleccionaron aquellos artículos publicados entre los años 2000 y 2020 que incluyeran estudios sobre la capacidad fitorremedadora del pasto Vetiver en agua contaminada con As y los relacionados con islas flotantes artificiales. Por otro lado, la literatura que no contaba con experimentos específicos, validaciones e indexación en revistas científicas, no se incluyeron. La búsqueda de documentos incluyó el idioma inglés y español. Los artículos elegidos inicialmente para el estudio fueron 97; de ellos se eliminaron 54 porque no cumplían con los criterios establecidos, seleccionando definitivamente para revisión bibliográfica un total de 43.

Discusión

El arsénico en ecosistemas acuáticos

El As es el vigésimo elemento más abundante en la corteza terrestre (Zhao *et al.*, 2010) particularmente inorgánico arsenic (Asi, es tóxico para los seres humanos principalmente por su consumo en el agua (Mondal *et al.*, 2006). Sus estados de oxidación varían (+5), (+3), (0) y (-3) y son los más comunes en el agua (Mondal *et al.*, 2006); coexistiendo en la naturaleza con Fe, Cu, Ni, Zn, etc. Reddy y DeLaune (2008) indican que en general, las formas inorgánicas de As son más tóxicas que las formas orgánicas y que el ión arsenito es más tóxico que el arseniato, también señalan que en ambientes acuáticos aeróbicos el As predomina como ión arseniato As (V) en la forma $[H_3AsO_4, H_2AsO_4^{-1}, HAsO_4^{-2}, AsO_4^{-3}]$ mientras que el ión arsenito As (III) como $[H_3AsO_3, H_2AsO_3^{-1}]$ es más

contaminado con As and those related to artificial floating islands, were selected. On the other hand, the literature that did not have specific experiments, validations and indexing in scientific journals, were not included. The document search included the English and Spanish languages. The articles initially chosen for the study were 97; 54 of them were eliminated because they did not meet the established criteria, definitively selecting a total of 43 for bibliographic review.

Discussion

Arsenic in aquatic ecosystems

As is the twentieth most abundant element in the earth's crust (Zhao *et al.*, 2010), it is toxic to humans mainly due to its consumption in water (Mondal *et al.*, 2006). Their oxidation states vary (+5), (+3), (0) and (-3) and are the most common in water (Mondal *et al.*, 2006); coexisting in nature with Fe, Cu, Ni, Zn, etc. Reddy and DeLaune (2008) indicate that in general, inorganic forms of As are more toxic than organic forms and that the arsenite ion is more toxic than arsenate, they also point out that in aerobic aqueous environments, As predominates as arsenate ion As (V) in the form $[H_3AsO_4, H_2AsO_4^{-1}, HAsO_4^{-2}, AsO_4^{-3}]$ while the arsenite ion As (III) as $[H_3AsO_3, H_2AsO_3^{-1}]$ is more frequent in anoxic environments. Although As is abundant in both terrestrial and aquatic environments, its presence in groundwater has received much attention due to its high concentrations (Ning, 2005). In areas such as the Bengal basin,

frecuente en ambientes anóxicos. Aunque el As abunda tanto en ambientes terrestres como acuáticos, su presencia en aguas subterráneas, ha recibido mucha atención, por las altas concentraciones (Ning, 2005). En zonas como la cuenca de Bengala, Tailandia, Italia, Argentina, Bolivia, Chile, México y Perú, se ha reportado niveles alarmantes de As de hasta 50 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ en las fuentes de agua utilizadas para consumo (Ning, 2005; Mondal *et al.*, 2006; Bundschuh *et al.*, 2008).

Presencia de arsénico en sedimentos

Según Reddy y DeLaune (2008), los metales pesados tóxicos en los suelos o sedimentos de humedales existen en varias formas y pueden sufrir numerosos procesos de transporte y transformación cuando ingresan a los humedales; la contribución anual de As al suelo es pequeña, pero se ha agregado una cantidad significativa a la columna sedimentaria durante el tiempo geológico. Estudios realizados sobre la concentración de de As en suelos indican que estos pueden alcanzar hasta 62,20 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ y se rigen principalmente por las características geológicas del mismo (Zuzolo *et al.*, 2020).

En los suelos de humedales, la cantidad de materia orgánica, minerales, pH y potencial redox rigen la solubilidad y movilidad del As. Para ciertas condiciones de potencial redox y pH, puede estar presente como un oxianión en la forma de arseniato o arsenito. A potenciales redox altos (desde +200 a +500 mV), el As (V) es la especie predominante mientras que, la reducción de As (V) a As (III)

Thailand, Italy, Argentina, Bolivia, Chile, Mexico and Peru, alarming levels of As of up to 50 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ have been reported in water sources used for consumption (Ning, 2005; Mondal *et al.*, 2006; Bundschuh *et al.*, 2008).

Presence of arsenic in sediments

According to Reddy and DeLaune (2008), toxic heavy metals in wetland soils or sediments exist in various forms and can undergo numerous transport and transformation processes when they enter wetlands; the annual contribution of As to the soil is small, but a significant amount has been added to the sedimentary column during geologic time. Studies carried out on the concentration of As in soils indicate that these can reach up to 62.20 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ and are mainly governed by its geological characteristics (Zuzolo *et al.*, 2020)

In wetland soils, the amount of organic matter, minerals, pH, and redox potential govern the solubility and mobility of As. For certain pH and redox potential conditions, it may be present as an oxyanion in the form of arsenate or arsenite. At high redox potentials (from +200 to +500 mV), As (V) is the predominant species, while the reduction of As (V) to As (III) occurs at redox levels within the nitrate reduction zone (+300 mV) (Reddy and DeLaune, 2008).

Phytoremediation as an alternative to remove arsenic

There are several methods for the removal of As within which are: use of adsorbents, chemicals, photochemicals and photocatalytic, oxidation processes, coagulation,

ocurre a niveles redox dentro de la zona de reducción de nitratos (+300 mV) (Reddy y DeLaune, 2008).

La fitorremediación como alternativa para remover arsénico

Existen varios métodos para la eliminación de As dentro de los cuales se encuentran: uso de adsorbentes, químicos, fotoquímicos y fotocatalíticos, procesos de oxidación, coagulación, floculación, precipitación, intercambio iónico y filtración por membrana, sin embargo, los altos costos de estas tecnologías las hacen prácticamente imposibles de aplicar en países en vía de desarrollo. Por otro lado, la fitorremediación demuestra ventajas con respecto a los procesos tradicionales, ya que utiliza plantas para limpiar suelos, sedimentos y agua contaminada con metales pesados y pesticidas (Shukla y Srivastava, 2017); las plantas fitorremediadoras son monitoreadas fácilmente a fin de asegurar un crecimiento adecuado; los metales removidos por las especies vegetales en muchos casos son recuperados y reutilizados (Wang *et al.*, 2010). Los principales mecanismos de fitorremediación de metales pesados son la fitoestabilización, donde las plantas inmovilizan los contaminantes en los suelos; en la fitoextracción las especies vegetales usan alta cantidad de biomasa, son hiperacumuladoras de metales pesados; en la fitofiltración o rizofiltración, en las raíces de las plantas que crecen en agua aireada, precipitan y se concentran metales tóxicos de los efluentes contaminados y en la fitovolatilización las plantas extraen metales y los liberan en una forma menos tóxica a la atmósfera

floculation, precipitation, ion exchange and membrane filtration, however, the high costs of these technologies make them practically impossible to apply in developing countries. On the other hand, phytoremediation shows advantages over traditional processes, since it uses plants to clean soils, sediments and water contaminated with heavy metals and pesticides (Shukla and Srivastava, 2017); phytoremediation plants are easily monitored to ensure proper growth; metals removed by plant species are in many cases recovered and reused (Wang *et al.*, 2010). The main mechanisms of heavy metal phytoremediation are phytostabilization, where plants immobilize pollutants in soils; in phytoextraction, plant species use a high amount of biomass, they are hyper-accumulators of heavy metals; In phytofiltration or rhizofiltration, in the roots of plants that grow in aerated water, toxic metals are precipitated and concentrated from contaminated effluents and in phytovolatilization the plants extract metals and release them in a less toxic form into the atmosphere through transpiration (inside the plant the pollutant is transformed or degraded before being released (Raskin and Ensley, 2000).

Artificial floating islands (IFA)

The IFA called "Floating Treatment Wetlands" (FTWs) will restore aquatic ecosystems (Colares *et al.*, 2020; Yeh *et al.*, 2015), with a good cost-efficiency ratio. They are constituted by a floating support base for the growth of macrophytes and have proven to be efficient in the remediation of waters

a través de la transpiración (dentro de la planta el contaminante es transformado o degradado antes de ser liberado (Raskin y Ensley, 2000).

Islas flotantes artificiales (IFA)

Las IFA denominadas en inglés "Floating Treatment Wetlands" (FTWs) restauraran ecosistemas acuáticos (Colares *et al.*, 2020; Yeh *et al.*, 2015) con una buena relación costo-eficiencia. Están constituidas por una base flotante de soporte para el crecimiento de macrófitas y han demostrado ser eficientes en la remediación de aguas con contenidos de nutrientes, materia orgánica y sustancias tóxicas (Tharp *et al.*, 2019). La base combina una matriz porosa, permeable y resistente a la degradación ambiental con un sustrato de hebras poliméricas para la colonización microbiana (Yeh *et al.*, 2015). La flotabilidad puede estar provista por tubos de polivinilo o polipropileno sellados, láminas de poliestireno, bambú, caña, paja, cebada y almohadillas de vinilo inflables (Tanner y Headley, 2011). El medio de crecimiento de las plantas tiene que ser seleccionado con precaución para favorecer el desarrollo de las raíces de las macrofitas, así como su colonización por biopelículas. Tanner y Headley (2011) consideran conservar depresiones en la cima de la matriz polimérica, para recibir el medio de crecimiento, que puede ser arena, turba de esfagno, compost neutralizado con piedra caliza, etc. La remoción de contaminantes en las IFA se realiza por medio de diversos mecanismos, como absorción de nutrientes y metales pesados, desarrollo de

with content of nutrients, organic matter and toxic substances (Tharp *et al.*, 2019). The base combines a porous, permeable and resistant matrix to environmental degradation with a substrate of polymeric strands for microbial colonization (Yeh *et al.*, 2015). Buoyancy can be provided by sealed polyvinyl or polypropylene tubes, polystyrene sheets, bamboo, reed, straw, barley, and inflatable vinyl pads (Tanner and Headley, 2011). The growth medium of the plants has to be selected with care to favor the development of the macrophyte roots, as well as their colonization by biofilms. Tanner and Headley (2011) consider preserving depressions at the top of the polymer matrix, to receive the growth medium, which can be sand, sphagnum peat, compost neutralized with limestone, etc. The removal of pollutants in the APIs is carried out through various mechanisms, such as absorption of nutrients and heavy metals, development of biofilms (Martínez-Peña and López-Candela, 2018), release of extracellular enzymes, sedimentation and binding of pollutants, as well as an increase in the flocculation of suspended matter (Tharp *et al.*, 2019).

Phytoremedial characteristics of Vetiver grass

Vetiver grass (*C. zizanioides* (L.) Roberty) formerly classified as *Vetiveria zizanioides* (Srivastava *et al.*, 2008) is a perennial herb of the Poaceae family, native to India and widely cultivated in tropical and subtropical regions of the world (Singh, 2017). It is a species adaptable to a wide range of climatic

biopelículas (Martínez-Peña y López-Candela, 2018), liberación de enzimas extracelulares, sedimentación y unión de contaminantes, así como aumento de la floculación de materia en suspensión (Tharp *et al.*, 2019).

Características fitorremediadoras del pasto Vetiver

El pasto Vetiver (*Chrysopogon zizanioides* (L.) Roberty) anteriormente clasificado como *Vetiveria zizanioides* (Srivastava *et al.*, 2008) es una hierba perenne de la familia Poaceae, nativa de la India y ampliamente cultivada en las regiones tropicales y subtropicales del mundo (Singh, 2017). Es una especie adaptable a una extensa gama de condiciones climáticas, fácil de cultivar, no tiene potencial para convertirse en maleza y tiene gran capacidad de acumular metales pesados (Lara y Navarro, 2017). Esta xerófita tiene la capacidad de sobrevivir bajo largas inundaciones, desarrollarse en ambientes hidropónicos y adaptarse a condiciones extremas de temperatura en el rango de -22 °C a 60 °C (Truong, 2003). Los contaminantes captados por pasto Vetiver, principalmente se acumulan en las raíces y muy poco se transloca a los brotes (Singh, 2017). El As es un elemento no esencial para las plantas, interfiere con su actividad fisiológica, biológica, inhibe el crecimiento y le causa estrés considerable (Praveen *et al.*, 2019); mientras que pasto Vetiver se adapta a estas condiciones. La raíz de este pasto, es el órgano principal de entrada y acumulación de As, en la cual hay un transporte radial que se sugiere fundamentalmente es apoplástico y que encuentra un

conditions, easy to grow, has no potential to become a weed and has a great capacity to accumulate heavy metals (Lara and Navarro, 2017). This xerophyte has the ability to survive under long floods, develop in hydroponic environments and adapt to extreme temperature conditions in the range of -22 °C to 60 °C (Truong, 2003). The pollutants captured by Vetiver grass, mainly accumulate in the roots and very little is translocated to the shoots (Singh, 2017). As is a non-essential element for plants, it interferes with their physiological and biological activity, inhibits growth and causes considerable stress (Praveen *et al.*, 2019); whereas Vetiver grass adapts to these conditions. The root of this grass is the main organ of entry and accumulation of As, in which there is a radial transport that is fundamentally suggested to be apoplastic and that finds a first important diffusion and regulation filter in the endodermis (Ravenscroft *et al.*, 2009). Plants such as Vetiver grass translocate a small fraction of metals from roots to shoots through the xylem with the transpiration stream (Van der Ent *et al.*, 2013). The roots act as a barrier against heavy metal translocation and may be a potential tolerance mechanism operating in the roots. Singh *et al.* (2017), when investigating the accumulation, translocation and tolerance of As in Vetiver grass seedlings, these did not experience significant toxicity after exposure to different concentrations of As (from 0.75 ppm to 15 ppm) after 7 days;

primer filtro importante de difusión y regulación en la endodermis (Ravenscroft *et al.*, 2009). Las plantas como el pasto Vetiver translocan una pequeña fracción de metales desde las raíces a los brotes a través del xilema con la corriente de transpiración (Van der Ent *et al.*, 2013). Las raíces actúan como barrera contra la translocación de metales pesados y puede ser un mecanismo de tolerancia potencial que opera en las raíces. Singh *et al.* (2017), al investigar la acumulación, translocación y tolerancia de As en plántulas del pasto Vetiver, estas no experimentaron toxicidad significativa tras la exposición a diferentes concentraciones de As (desde 0,75 ppm hasta 15 ppm) después de 7 días; sin embargo, observan un aumento de toxicidad después de 14 días.

Islas flotantes artificiales (IFA) con pasto Vetiver

El pasto Vetiver se cultiva en cuerpos de agua contaminados, utilizando matrices flotantes, como una balsa de bambú o tubos de PVC (Roongtanakiat *et al.*, 2007). El pasto se transplanta a las matrices flotantes después de aproximadamente 3 meses de adaptación con 30 cm de raíz. Cuando se instala en el agua, se deben podar las hojas a 20-30 cm, aplicar té de estiércol u otro fertilizante al agua y mantenerlas hasta que alcancen unos 40 cm de raíz (Lara y Navarro, 2017). Después de 15 días, es posible evaluar la eficacia en la remoción de arsénico con pasto Vetiver a diferentes biomásas (5 kg, 10 kg, 15 kg, 20 kg, 25 kg) obteniendo remoción de hasta el 40% para arsénico (Smolcz *et al.*, 2015). Los parámetros: pH, turbidez,

however, they observe an increase in toxicity after 14 days.

Artificial floating islands (IFA) with Vetiver grass

Vetiver grass is grown in contaminated bodies of water, using floating matrices, such as a bamboo raft or PVC pipes (Roongtanakiat *et al.*, 2007). The grass is transplanted to the floating matrices after approximately 3 months of adaptation with 30 cm of roots. When it is installed in water, the leaves should be pruned to 20-30 cm, manure tea or other fertilizer applied to the water and kept until they reach about 40 cm from the roots (Lara and Navarro, 2017). After 15 days, it is possible to evaluate the efficiency in the removal of arsenic with Vetiver grass at different biomasses (5 kg, 10 kg, 15 kg, 20 kg, 25 kg) obtaining removal of up to 40 % for arsenic (Smolcz *et al.*, 2015). The parameters: pH, turbidity, alkalinity, OD, fecal coliforms (Mathew *et al.*, 2016), DBO₅, suspended solid DQO, color removal (Charoenlarp *et al.*, 2016) and mainly As (Singh *et al.*, 2017) in various types of effluents, they are regulated by the processes that occur at their roots. In this sense, due to their high tolerance towards various types of pollutants, the IFAs with Vetiver grass are installed in rivers to improve water quality; for example, Kusin *et al.* (2019) through the implementation of this system, verified a 14 % increase in the water quality index (WQI) in polluted rivers. The application of this technology for As shows 40 % removal efficiency under controlled conditions (Smolcz *et al.*, 2015); while in the field, the remediation efficiency varies from

alcalinidad, OD, coliformes fecales (Mathew *et al.*, 2016), DBO₅, DQO sólidos suspendidos, remoción de color (Charoenlarp *et al.*, 2016) y principalmente As (Singh *et al.*, 2017) en varios tipos de efluentes, son regulados por los procesos que ocurren en sus raíces. En este sentido, debido a su alta tolerancia hacia varios tipos de contaminantes las IFA con pasto Vetiver se instalan en ríos para mejorar la calidad de agua; por ejemplo, Kusin *et al.* (2019) resulting in 14 % increase of the overall WQI. It was proposed that treatment system performance for FVI can be reflected by the number of pontoons (FVIs mediante la implementación de este sistema, verificaron un incremento del 14 % en el índice de calidad de agua (WQI) en ríos contaminados. La aplicación de esta tecnología para As evidencia 40 % de eficiencia de remoción en condiciones controladas (Smolcz *et al.*, 2015); mientras que en campo, la eficiencia de remediación varía de 80 % en cinco días a 35 % en quince días (Lara y Navarro, 2017).

Disposición final del material vegetal

La materia vegetal usada en la fitorremediación, es el punto de atención, debido a la posible contaminación tóxica que puede acumular. Varios autores han propuesto usos posteriores de los residuos vegetales de pasto Vetiver, por ejemplo Wang *et al.* (2010), mencionan que los brotes pueden ser consumidos por animales de forma segura o cosechados ya que muy poco del As se translocan. Adicionalmente, la raíz puede ser una fuente de

80 % in five days to 35 % in fifteen days (Lara and Navarro, 2017).

Final disposal of plant material

The plant matter used in phytoremediation is the point of attention, due to the possible toxic contamination that it can accumulate. Several authors have proposed subsequent uses of Vetiver grass plant residues, for example Wang *et al.* (2010), mention that the shoots can be consumed by animals safely or harvested since very little of the As is translocated. Additionally, the root can be a source of essential oils (Roongtanakiat *et al.*, 2007). Finally, biomass can be used as fuel in a pyrolysis system to produce energy (Ladislas *et al.*, 2015).

Mathematical model for the evaluation of heavy metal removal

The mechanism of biosorption of metals using living cells, for example: Vetiver grass plant, rice, etc. It occurs in two stages: during the first stage, metal ions are adsorbed by the surface in the metal-electrophilic functional group interaction exposed to the cell exterior. In the second stage, in the active biosorption process, the selected species penetrate the cell membrane (Ismail *et al.*, 2014). The mathematical modeling of the As sorption processes in aqueous media in living cells has been studied using three groups of models: (1) Isotherm method (Langmuir sorption isotherms, Freundlich sorption isotherms, Dubinin-Radushkevich sorption isotherms R-D); (2) Thermodynamic evaluation of the processes and (3) Sorption kinetics corresponding to pseudo first and second order kinetic

aceites esenciales (Roongtanakiat *et al.*, 2007). Finalmente la biomasa puede usarse como combustible en un sistema de pirólisis para producir energía (Ladislas *et al.*, 2015).

Modelo matemático para evaluación de remoción de metales pesados

El mecanismo de biosorción de metales usando células vivas, por ejemplo: la planta de pasto Vetiver, arroz, etc. ocurre en dos etapas: durante la primera etapa, los iones metálicos son adsorbidos por la superficie en la interacción metal - grupos funcionales electrofílicos expuestos hacia el exterior celular. En la segunda etapa, en el proceso de biosorción activa, las especies seleccionadas penetran en la membrana celular (Ismail *et al.*, 2014). La modelación matemática de los procesos de sorción de As en medios acuosos en células vivas se ha estudiado mediante tres grupos de modelos: (1) Método de las isotermas (isotermas de sorción de Langmuir, isotermas de sorción Freundlich, isotermas de sorción Dubinin-Radushkevich R-D); (2) Evaluación termodinámica de los procesos y (3) Cinética de sorción que corresponde a modelos cinéticos de pseudo primer y segundo orden, transferencia de masa, difusión intraparticular, modelo de Richenberg, ecuación de Elovich (Ranjan *et al.*, 2009; Sahmoune, 2016). Para el caso del arroz y en general para los procesos de biosorción, los modelos cinéticos de pseudo segundo orden y pseudo primer orden, modelan mejor la biosorción de As (He y Chen, 2014; Ismail *et al.*, 2014; Ranjan *et al.*, 2009; Sahmoune, 2016), generando

models, mass transfer, intraparticular diffusion, Richenberg model, Elovich equation (Ranjan *et al.*, 2009; Sahmoune, 2016). For the case of rice and in general for the biosorption processes, the kinetic models of pseudo second order and pseudo first order, better model the biosorption of As (He and Chen, 2014; Ismail *et al.*, 2014; Ranjan *et al.*, 2009; Sahmoune, 2016), generating interest in the implementation of the models in the case of live cells of Vetiver grass.

Conclusions

Contamination by inorganic As, in the form of arsenate As (V) in surface waters, groundwater and sediments is a problem worldwide, because its presence not only comes from anthropogenic sources but also from natural sources.

The physiological characteristics of Vetiver grass: fast growth, high biomass production, distributed and deep root system, make it an excellent candidate to be applied as a phytoremediate species of arsenic in water, soils and sediments.

Vetiver grass works through phytofiltration mechanisms, adapts to wetland conditions, withstands extreme climatic conditions, is not an invasive species, accumulates metals in the roots and translocates small amounts to the shoots. The plant material used in phytoremediation has potential for the manufacture of biofuels by taking advantage of the removed biomass.

Based on the literature reviewed, it is concluded that Vetiver grass is an

interés en la implementación de los modelos en el caso de células vivas de pasto Vetiver.

Conclusiones

La contaminación por As inorgánico, en forma de arseniato As (V) en aguas superficiales, subterráneas y sedimentos es una problemática a nivel mundial, debido a que su presencia no solo proviene de fuentes antropogénicas sino también de fuentes naturales.

Las características fisiológicas del pasto Vetiver: crecimiento rápido, alta producción de biomasa, sistema radicular distribuido y profundo, lo hacen un excelente candidato para ser aplicado como una especie fitoremediadora de arsénico del agua, suelos y sedimentos.

El pasto Vetiver trabaja por medio de mecanismos de fitofiltración, se adapta a las condiciones de humedales, soporta condiciones climáticas extremas, no es una especie invasiva, acumula metales en las raíces y transloca pequeñas cantidades a los brotes. El material vegetal utilizado en la fitorremediación tiene potencial para la fabricación de biocombustibles mediante el aprovechamiento de la biomasa removida.

Con base en la literatura revisada, se concluye que el pasto Vetiver es una alternativa eficaz en la remoción de As y su efecto puede ser amplificado al implementar un lecho flotante artificial, desde el punto de vista técnico y económico. Para garantizar la efectividad de las IFA con pasto Vetiver se debe cumplir con

effective alternative in the removal of As and its effect can be amplified by implementing an artificial floating bed, from the technical and economic point of view. To guarantee the effectiveness of the IFAs with Vetiver grass, the criteria of buoyancy, durability, easy installation, resistance to environmental degradation, plant adaptation and economic affordability must be met.

The kinetic models of pseudo first and pseudo second order can be considered as potential methods for the analysis of the biosorption of As with Vetiver grass, after validation and may serve as design tools.

End of English Version

criterios de flotabilidad, durabilidad, fácil instalación, resistencia a la degradación ambiental, adaptación de la planta y asequibilidad económica.

Los modelos cinéticos de pseudo primer y pseudo segundo orden se pueden considerar como métodos potenciales para el análisis de la biosorción de As con pasto Vetiver, previa validación y podrán servir como herramientas de diseño.

Literatura Citada

- Bundschuh, J., M. Armienta, P. Birkle, P. Bhattacharya, J. Matschullat y A. Mukherjee. 2008. Natural Arsenic in Groundwaters of Latin America. First Edition. CRC Press. London. 782 p.
- Charoenlarp K., K. Surakul, P. Winitkhetkamnoun, P. Kanthupthim, P. Panbumrung y S. Udorn. 2016. Textile wastewater treatment using vetiver grass cultivated with floating platform technique. RMUTKJ. 10:51-57.

- Colares, G. S., N. Dell'Osbel, P. G. Wiesel, G. A. Oliveira, P. H. Z. Lemos, F. P. da Silva, C. A. Lutterbeck, L. T. Kist y É. L. Machado. 2020. Floating treatment wetlands: A review and bibliometric analysis. *Sci. Entorno total*. 714:136776.
- Dinwiddie, E. y X. M. Liu. 2018. Examining the Geologic Link of Arsenic Contamination in Groundwater in Orange County, North Carolina. *Front. Earth Sci.* 6:111.
- He, J. y J. P. Chen. 2014. A comprehensive review on biosorption of heavy metals by algal biomass: Materials, performances, chemistry, and modeling simulation tools. *Bioresour. Technol.* 160: 67-78.
- He, Y., H. Lin, X. Jin, Y. Dong y M. Luo. 2020. Simultaneous reduction of arsenic and cadmium bioavailability in agriculture soil and their accumulation in *Brassica chinensis* L. by using minerals. *Ecotoxicol. Reinar. Saf.* 198:110660.
- Ismail, I., T. Mostafa, A. Sulaymon y S. Abbas. 2014. Bisorption of heavy metals: A review. *JCST*. 3:74.
- Kusin, F. M., S. N. M. S. Hasan, N. A. Nordin, F. Mohamat-Yusuff y Z. Z. Ibrahim. 2019. Floating Vetiver island (FVI) and implication for treatment system design of polluted running water. *Appl. Ecol. Environ. Res.* 17(1):497-510.
- Ladislav, S., C. Gérente, F. Chazarenc, J. Brissin, y Y. Andrès, 2015. Floating treatment wetlands for heavy metal removal in highway stormwater ponds. *Ecol. Ing.* 80:85-91.
- Lara, S. y R. Navarro. Resultados y Lecciones en Sistema Vetiver para descontaminación de agua y aumento de su disponibilidad para riego. 2017. Fundación para la Innovación Agraria (FIA). Chile. 48p. Disponible en: https://www.opia.cl/static/website/601/articles-87024_archivo_01.pdf. Fecha de consulta: diciembre 2019.
- Li, Y., X. Zhu, X. Qi, B. Shu, X. Zhang, K. Li, Y. Wei, F. Hao y H. Wang. 2020. Efficient removal of arsenic from copper smelting wastewater in form of scorodite using copper slag. *J. Clean. Prod.* 270:122428.
- Martínez-Peña, L., y C. López-Candela. 2018. Islas flotantes como estrategia para el establecimiento de plantas acuáticas en el Jardín Botánico de Bogotá. *Gestión y Ambiente*. 21(1):110-120.
- Mathew, M., Sr. C. Rosary. M. Sebastian y S. M. Cherian. 2016. Effectiveness of Vetiver System for the Treatment of Wastewater from an Institutional Kitchen. *Procedia Technology*. 24:203-209.
- Mondal, P., C. B. Majumder y B. Mohanty. 2006. Laboratory based approaches for arsenic remediation from contaminated water: Recent developments. *J. Hazard. Mater.* 137(1):464-479.
- Morales-Simfors, N., J. Bundschuh, I. Herath, C. Inguaggiato, A. T. Caselli, J. Tapia, F. E. A. Choquehuayta, M. A. Armienta, M. Ormachea, E. Joseph y D. L. López. 2019. Arsenic in Latin America: A critical overview on the geochemistry of arsenic originating from geothermal features and volcanic emissions for solving its environmental consequences. *Sci. Total Environ.* 716:135564.
- Ning, R. Y. 2005. Arsenic in Natural Waters. p. 81-83. *In*: J. H. Lehr y J. Keeley (Eds.). *Water Encyclopedia*. First edition. John Wiley & Sons, Inc.
- Pilon-Smits, E. 2005. Phytoremediation. *Annu Rev Plant Biol.* 56(1):15-39.
- Pincetti-Zúniga, G. P., L. A. Richards, Y. M. Tun, H. P. Aung, A. K. Swar, U. P. Reh, T. Khaing, M. M. Hlaing, T. A. Myint, M. L. Nwe y D. A. Polya. 2020. Major and trace (including arsenic) groundwater chemistry in central and southern Myanmar. *Appl. Geochemistry*. 115:104535.
- Prasad, M. N. V. 2003. Phytoremediation of Metal-Polluted Ecosystems: Hype for Commercialization. *Russ. J. Plant Physiol.* 50(5):686-701.
- Praveen, A., S. Mehrotra y N. Singh. 2019. Mixed plantation of wheat and accumulators in arsenic contaminated

- plots: A novel way to reduce the uptake of arsenic in wheat and load on antioxidative defence of plant. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 182:109462.
- Ranjan, D., M. Talat y S. H. Hasan. 2009. Biosorption of arsenic from aqueous solution using agricultural residue 'rice polish'. *J. Hazard. Mater.* 166(2-3):1050-1059.
- Raskin, I. y B. D. Ensley. 2000. Phytoremediation of toxic metals: Using plants to clean up the environment. *J. Wiley.* 304 p.
- Ravenscroft, P., H. y K. S. Richards. 2009. Arsenic pollution: A global synthesis. Wiley-Blackwell. Wiley-Blackwell. RGS-IBG book series. 588 p.
- Reddy, K. R., y R. D. DeLaune. 2008. Biogeochemistry of wetlands: Science and applications. CRC Press. 774 p.
- Rong, Z., X. Tang, L. Wu, X. Chen, W. Dang y Y. Wang. 2020. A novel method to synthesize scorodite using ferrihydrite and its role in removal and immobilization of arsenic. *J. Mater. Res. Technol.* 9(3):5848-5857.
- Roongtanakiat, N., S. Tangruangkit y R. Meesat. 2007. Utilization of Vetiver Grass (*Vetiveria zizanioides*) for Removal of Heavy Metals from Industrial Wastewaters. *Sci. Asia.* 33(4):397.
- Sahmoune, M. N. 2016. The Role of Biosorbents in the Removal of Arsenic from Water. *Chem Eng Technol.* 39(9):1617-1628.
- Samal, K. 2019. Ecological floating bed (EFB) for decontamination of polluted water bodies: Design, mechanism and performance. *J Environ Sci Manag.* 13: 1-13.
- Shu, W. y Xia, H. 2003. Integrated vetiver technique for remediation of heavy metal contamination: potential and practice. In The third international conference on Vetiver. Disponible en: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.688.7992&rep=rep1&type=pdf>. Fecha de consulta: diciembre 2019.
- Shukla, A. y S. Srivastava. 2017. Emerging Aspects of Bioremediation of Arsenic. p. 395-407. *In*: R. Singh y S. Kumar (Eds.). *Green Technologies and Environmental Sustainability*. Springer International Publishing.
- Singh, S., S. Sounderajan, K. Kumar y D. P. Fulzele. 2017. Investigation of arsenic accumulation and biochemical response of *in vitro* developed *Vetiveria zizanioides* plants. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 145:50-56.
- Siyar, R., F. D. Ardejani, M. Farahbakhsh, P. Norouzi, M. Yavarzadeh y S. Maghsoudy. 2020. Potential of Vetiver grass for the phytoremediation of a real multi-contaminated soil, assisted by electrokinetic. *Chemosphere.* 246:125802.
- Smolcz, S.U. y V.G. Cortés. 2015. Remediation of boron contaminated water and soil with vetiver phytoremediation technology in Northern Chile. In 6th International Conference on Vetiver (ICV6). Disponible en <https://icv-7.com/wp-content/uploads/2019/09/1-S.-Ugalde-Smolcz-Paper.pdf>. Fecha de consulta: Mayo 2019.
- Srivastava, J., S. Kayastha, S. Jamil, y V. Srivastava. 2008. Environmental perspectives of *Vetiveria zizanioides* (L.) Nash. *Acta Physiol. Plant.* 30(4):413-417.
- Srivastava, S., P. Suprasanna y S. F. D'Souza. 2012. Mechanisms of Arsenic Tolerance and Detoxification in Plants and their Application in Transgenic Technology: A Critical Appraisal. *Int. J. Phytoremediation.* 14(5):506-517.
- Tanner, C. C., y T. R. Headley. 2011. Components of floating emergent macrophyte treatment wetlands influencing removal of stormwater pollutants. *Ecol. Eng.* 37: 474-486.
- Tharp, R., K. Westhelle y S. Hurley. 2019. Macrophyte performance in floating treatment wetlands on a suburban stormwater pond: Implications for cold climate conditions. *Ecol. Eng.* 136: 152-159.
- Truong P. 2003. Vetiver grass system: Potential applications for soil and water conservation in northern California. *Proceedings of the Third International Vetiver Conference,*

China. Disponible en: http://www.vetiver.org/ICV3-Proceedings/AUS_California.pdf. Fecha de consulta: enero de 2020.

Van der Ent, A., A. J. M. Baker, R. D. Reeves, A. J. Pollard, y H. Schat. 2013. Hyperaccumulators of metal and metalloid trace elements: Facts and fiction. *Plant Soil*. 362(1-2):319-334.

Wang, L. K., J. H. Tay, S. T. L. Tay y Y. T. Hung. 2010. *Environmental bioengineering*. Springer Science & Business Media. New York. 867 p.

Yeh, N., P. Yeh y Y. H. Chang. 2015. Artificial floating islands for environmental improvement. *Renew. Sust. Ener. Rev.* 47:616-622.

Zhao, F. J., S. P. McGrath, y A. A. Meharg. 2010. Arsenic as a Food Chain Contaminant: Mechanisms of Plant Uptake and Metabolism and Mitigation Strategies. *Annu. Rev. Plant Biol.* 61(1):535-559.

Zuzolo, D., D. Cicchella, A. Demetriades, M. Birke, S. Albanese, E. Dinelli, A. Lima, P. Valera y B. De Vivo. 2020. Arsenic: Geochemical distribution and age-related health risk in Italy. *Environ. Res.* 182: 1-17.