

Diseño y Monitoreo de un Sistema de Depuración Natural de Aguas Residuales. Experiencia en una PyME Metalúrgica de la Ciudad de Rafaela^ξ

*Manuel Schmelzle**
*María Aneley Routier***

Resumen

La Universidad Nacional de Rafaela (UNRaf) tiene entre sus objetivos, la vinculación con el sector productivo para fomentar su desarrollo con acciones y enfoques innovadores. En este marco, el presente artículo describe un proyecto innovador llevado a cabo junto a una PyME (Pequeña y Mediana Empresa) metalúrgica local que consiste en diseñar y monitorear una depuración natural de efluentes cloacales e industriales. Se propone purificar, en una primera etapa, la línea de efluentes cloacales utilizando una cámara séptica que elimine gran parte de los sólidos suspendidos en el efluente. La segunda etapa biológica, consiste en una fitodepuración en forma de laguna con flujo subterráneo. La línea del efluente industrial es sometida a un pretratamiento químico de coagulación/floculación. Luego, esta agua pre-tratada se envía a la cámara séptica, junto al efluente cloacal. Esta mezcla pasa a continuación a la fitodepuración donde se logra la purificación final. El grupo de investigación de la UNRaf asesora técnicamente todo el proceso de diseño, puesta en marcha y monitoreo de la planta.

Palabras claves: Humedales construidos, fitodepuración, efluentes cloacales, efluentes industriales, industria metalúrgica

Abstract

The National University of Rafaela (UNRaf), has among its objectives the link with the productive sector to promote its development with innovative actions and approaches. In this framework, this article describes an innovative project carried out together with a local metallurgical SME (Small and Medium-sized Enterprises) that consists of designing and monitoring a natural sewage treatment plant of sewage and industrial effluents. It is proposed to purify, in a first stage, the line of sewage effluents using a septic tank that removes a large part of the suspended solids in the effluent. The second biological stage consists of a constructed wetland (CW) in the form of a lagoon with sub-surface-flow. The industrial effluent line is subjected to a chemical pre-treatment of coagulation / flocculation. Then, this pre-treated water is sent to the septic tank, together with the sewage effluent. This mixture then passes to the CW where the final purification is achieved. The UNRaf research group technically advises the entire design, commissioning and monitoring process of the plant.

^ξ Recibido 07 de mayo 2018 / Aceptado 26 de junio 2018.

* Ingeniero Ambiental (Master of Science, Universidad de Stuttgart, Alemania), Investigador Docente Universidad Nacional de Rafaela. Correo electrónico: manuelschmelzle@unraf.edu.ar

** Ingeniera Ambiental, Universidad Nacional del Litoral Santa Fe, Investigadora Docente Universidad Nacional de Rafaela. Correo electrónico: aneleyroutier@unraf.edu.ar

Keywords: Constructed wetlands, phytodepuration, sewage effluents, industrial effluents, metallurgical industry

1. Introducción

Rafaela es una ciudad con un fuerte desarrollo industrial, caracterizado tanto por pequeñas y medianas empresas (PyMEs), como grandes empresas. Un número importante de ellas se encuentran emplazadas en el Parque de Actividades Económicas de Rafaela (PAER), aunque también se localizan en otros puntos de la ciudad.

En lo que se refiere al control de los aspectos ambientales, específicamente las condiciones de vuelco, es ejecutado por el Municipio local y el Estado Provincial. Las actividades industriales deben realizar el tratamiento de sus efluentes cloacales e industriales y garantizar una correcta disposición de los mismos (Ley Provincial 11.717, Ley Provincial N°11.220 y Resolución 1089/82 fijan los límites para el vuelco de efluentes a los cuerpos de agua).

Si bien la ciudad de Rafaela cuenta con una Red de Desagües Cloacales con 90,5% de cobertura de la población al servicio (Aguas Santafesinas, 2018), y una planta de tratamiento para el efluente cloacal recolectado, la situación actual para el sector industrial es diferente. Según datos oficiales (Ministerio de Industria, 2018), los terrenos industriales del PAER, (inauguración 1997) y el Parque Industrial Ing. Víctor Monti, no tienen sistemas de desagües cloacales para los efluentes producidos.

Esta situación lleva a plantear otras alternativas tecnológicas para este sector, siendo la fitodepuración una opción innovadora para el tratamiento de los efluentes cloacales e industriales. En este sentido y considerando que la Universidad Nacional de Rafaela, tiene como ejes la vinculación y transferencia de conocimiento con fuerte anclaje al territorio, se propone acompañar desde la UNRaf, a una PyME metalúrgica de la ciudad de Rafaela, llevando adelante la investigación teórica, el diseño y la ejecución del proyecto de fitodepuración para el tratamiento de sus efluentes. El proceso tecnológico completo, consiste en una cámara séptica, fitodepuración e infiltración, la investigación incluye el monitoreo y el mejoramiento iterativo del proceso.

A principios de 2018, la Organización de la Naciones Unidas (ONU) publica su “Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo [sic] de los Recursos Hídricos 2018” que lleva el título “Soluciones basadas en la Naturaleza para la Gestión del Agua”. En este informe define el concepto de la purificación de efluentes como “Soluciones basadas en la Naturaleza (SbN)”, las cuales son objeto de estudio de este proyecto. Las Soluciones Basadas en la Naturaleza son un concepto nuevo que abarca a todas las acciones que se apoyan en los ecosistemas y los servicios que estos proveen, para responder a diversos desafíos de la sociedad como la seguridad alimentaria o el riesgo de desastres. Las SbN son imitaciones técnicas inspiradas en procesos naturales para llegar a una meta deseada. En el caso de este trabajo, se imita un sistema de humedal natural con sus sinergias entre plantas y microbiología para eliminar contaminantes del agua residual domiciliar e industrial. “Los humedales construidos que imitan la funcionalidad de los humedales naturales, se encuentran entre las SbN más utilizadas para el tratamiento de aguas residuales domésticas. Utilizan la vegetación de

los humedales, los suelos y sus funciones microbianas asociadas, para eliminar el exceso de nitrógeno, fósforo, potasio y contaminantes orgánicos. Los humedales naturales y construidos también biodegradan o inmovilizan una variedad de contaminantes emergentes.” (WWAP , 2018, pág. 65)

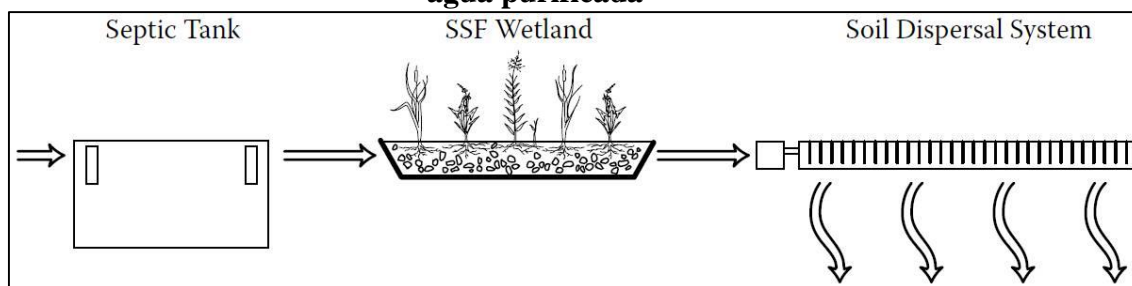
Las denominaciones para esta tecnología son variadas, siendo la más completa: “fitodepuración mediante humedales (wetland en inglés) construidos/artificiales” (González , 2018). En este trabajo, se utiliza el nombre de “fitodepuración”, ya que los autores encuentran esta denominación más breve y adecuada.

2. ¿En qué consisten los sistemas de fitodepuración?

Un sistema de fitodepuración de aguas residuales consiste en la reducción de contaminantes de los efluentes cloacales e industriales por medio de una serie de procesos físicos, biológicos y químicos en los que participan plantas y microorganismos del ecosistema húmedo. El sistema en conjunto se compone por un pretratamiento químico de los efluentes industriales, una cámara séptica, la fitodepuración propiamente descrita y la infiltración al suelo del agua purificada. En esta sección se realiza una descripción en detalle del proceso de fitodepuración y cada una de sus etapas, previamente se aclaran los conceptos de efluentes, industriales y cloacales.

En Argentina, la tecnología de fitodepuraciones para tratar efluentes cloacales e industriales pre-tratados, no se encuentra muy desarrollada y aplicada. Existen algunas experiencias de transferencias de tecnología y estudios realizados en la ciudad de Santa Fe, como ser el caso desarrollado por la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional del Litoral (UNL) que diseñó humedales para el tratamiento final de efluentes de dos Industrias Metalúrgicas (Hadad & Maine, 2016), (Maine, M.A., et al, 2016) y (Hadad, Mufarrije, Di Luca, & Maine, 2009).

Figura 1. Visión de conjunto: cámara séptica, fitodepuración e infiltración del agua purificada



Fuente: Kadlec & Wallace (2009)

Las aguas residuales pueden definirse como las aguas que provienen del sistema de abastecimiento de agua de una población, después de haber sido modificadas por diversos usos en actividades domésticas, industriales y comunitarias (Mara, 1976). Según su origen, las aguas residuales resultan de la combinación de líquidos y residuos sólidos transportados por el agua que provienen de residencias, oficinas, edificios comerciales e instituciones, junto con los residuos de las industrias y de actividades agrícolas, así como de las aguas subterráneas, superficiales o de precipitación que también pueden agregarse eventualmente al agua residual.

Se clasifican en: Domésticas, Industriales, Infiltración y Pluvial. Este trabajo se realiza con las Aguas Residuales Domésticas (también denominadas Efluentes Cloacales), y las Aguas Residuales Industriales (o Efluentes Industriales).

➤ Efluentes cloacales

Se define efluente cloacal a las aguas residuales producidas por desechos biológicos humanos (aguas negras/fecales) y por el uso doméstico como lavado de ropa, vajilla, etc. (aguas grises). Las aguas negras por general contienen agentes patógenos o coliformes con riesgo elevado para la salud humana. La composición del efluente cloacal queda definida por sus constituyentes físicos, químicos y biológicos. En la

Tabla 1, se presentan los valores típicos de los principales constituyentes encontrados en el efluente cloacal domiciliario. En función de las concentraciones de estos constituyentes, podemos clasificar el agua residual como concentrada, media o débil.

Se observa que los parámetros con mayor importancia en los efluentes cloacales, son: Solidos Totales (ST), Solidos Sedimentables (en reposo dentro de una hora), Demanda Química de Oxígeno (DQO), Demanda Biológica de Oxígeno en cinco días (DBO₅). Los parámetros con menor concentración son: Nitrógeno (N total), nitrato y fósforo (orgánico e inorgánico). Un parámetro importante de los efluentes cloacales, es la concentración de bacterias coliformes. Uno evalúa el orden de magnitud de su número por unidades logarítmicas en 100 ml del efluente.

Tabla 1. Constituyentes físicos, químicos y biológicos de efluentes cloacales, parámetros elegidos

PARÁMETROS	CONCENTRACIONES			
	Unidades	Baja	Media	Alta
SOLIDOS TOTALES SUSPENDIDOS (STS)	(mg/l)	350	720	1200
SÓLIDOS SEDIMENTABLES (SS)	(mg/l)	5	10	20
DQO	(mg/l)	110	220	400
DBO ₅	(mg/l)	250	500	1000
NITRÓGENO TOTAL	(mg/l)	20	40	85
FÓSFORO TOTAL	(mg/l)	4	8	15
FÓSFATO	(mg/l)	1	3	5
COLIFORMES TOTALES	n°/100ml	10 ⁶ -10 ⁷	10 ⁷ -10 ⁸	10 ⁷ -10 ⁹

Fuente: elaboración propia en base a (Metcalf & Eddy, 1996)

➤ Efluentes Industriales

Se denomina efluentes industriales a las aguas contaminadas por procesos industriales que contienen sustancias en su mayor parte químicas y físicas como: sales, metales pesados, sustancias eutróficas (fosfatos, nitratos) y/o partículas sólidas de minerales o metales. Comúnmente, estos efluentes presentan condiciones físicas o fisicoquímicas problemáticas como pH extremo, alta salinidad y/o temperaturas altas. Las Soluciones basadas en la Naturaleza (SbN) tienen capacidad limitada de purificar aguas industriales, en parte debido a la gran concentración de contaminantes en los efluentes industriales. Sin embargo, tanto las plantas como los microorganismos tienen potencial en eliminar estas sustancias (WWAP, 2018, pág. 68).

En el marco de este proyecto se pretende purificar efluentes industriales de una PyME metalúrgica que genera la mayor parte de sus efluentes en los procesos de la preparación previa de chapas para la línea de pintura: desengrase, fosfatación y lavados. Este tratamiento es necesario para limpiar y preparar las superficies de los metales para los requerimientos técnicos de la pintura. Las sustancias a tener en cuenta más importantes en los efluentes de estos procesos son: la alta concentración de Fosfato y Zinc, Calcio y Sodio, la Demanda Química de Oxígeno (DQO), el pH y Detergentes Aniónicos.

➤ Digresión: Arsénico

Es importante mencionar la concentración de arsénico que se encuentra en las aguas subterráneas de la zona. Al respecto, la Organización Mundial de la Salud (OSM) declara el arsénico como “una de las 10 sustancias químicas más preocupantes para la salud pública” con un límite recomendado en agua potable de 10 µg As/L (WHO / OMS, 2011). En la provincia de Santa Fe el límite recomendado por ley 11.220 es 50 µg As/L.

En Argentina, y en particular en Rafaela y la región, las aguas subterráneas contienen valores elevados de arsénico, superando ampliamente los límites. Se midieron valores de arsénico total de entre 20 hasta 2000 µg As/L, la mayor parte de As⁵⁺ en acuíferos de profundidades entre 12 y 30 metros (Schierano, Laorden, & Aimo, sin año) (Sigfried & Hahn-Tomer, 2015). El arsénico (As) es un elemento de la tabla periódica que se encuentra en el grupo de los semimetales. Disuelto en agua, el arsénico se presenta como As³⁺ (arsenito) y As⁵⁺ (arseniato), de las cuales el arsenito es el más tóxico para el humano y el más difícil de eliminar del agua contaminada.

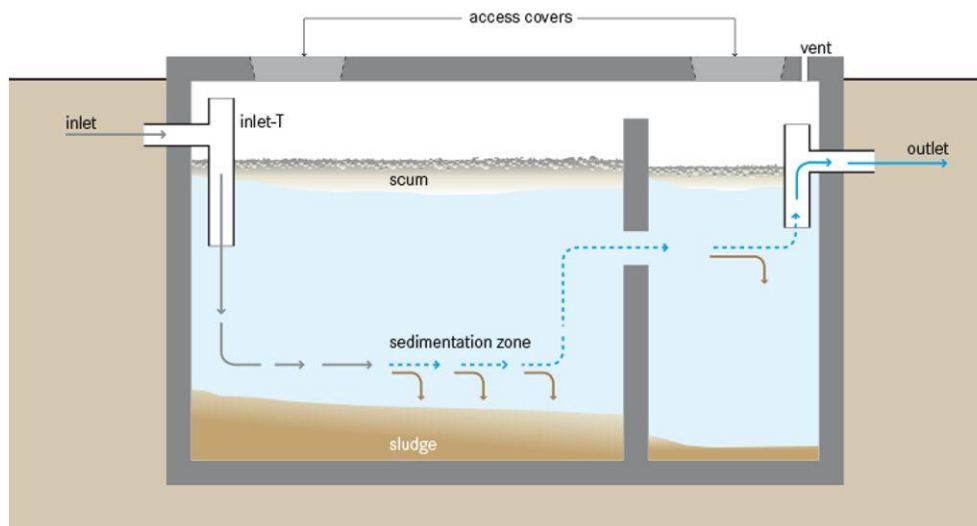
Existen varios trabajos que muestran la posibilidad de eliminar arsénico con fitodepuraciones: Corroto, Calderón, et al. (2016) mostraron que las especies de plantas *Cyperus haspan* y *Stipa* tienen un potencial importante de acumular Arsénico en sus raíces y hojas. Pröter (2007) pudo mostrar la reducción de contaminaciones de unos 300 µg As/L a unos 5 µg As/L con fitodepuraciones en Vietnam. Krüger & Holländer (2006) utilizaron el acuífero mismo para inyectar agua contaminada enriquecida con oxígeno y Cloruro de hierro (III). Pudieron lograr una reducción de arsénico desde 1,6 mg/l a 0,4 mg/l. Los efectos de esta reducción de arsénico por aireación y precipitación son interesantes para poder explicar algunos de los numerosos efectos que tienen lugar en el sustrato de una laguna de fitodepuración.

2.1. Cámara séptica

La cámara séptica, también denominada fosa séptica, generalmente forma la primera etapa de un tratamiento con fitodepuraciones. Es un tratamiento que consiste en una variedad amplia de procesos simultáneos que influyen uno al otro. El proceso más importante es la sedimentación (mecánica) de sólidos al fondo de la cámara y procesos biológicos por degradación anaeróbica (por microorganismos en ausencia de oxígeno) que tienen lugar en la zona de sedimentación (véase Figura 1). Sustancias sólidas con una densidad más baja que el agua flotan a la superficie donde se degradan o compactan hasta sedimentar. Las secciones de la cámara están separadas por paredes de sumersión que no dejan pasar la capa flotante. Un efecto secundario que tiene lugar en la matriz

del efluente es el proceso de sorción (adsorción y absorción). El proceso de la sorción se define por efectos físico-químicos en que se adhieren partículas o iones a la superficie de otras partículas más grandes que están separados por sedimentación en la cámara séptica. Además, en el ambiente anaeróbico bacterias parcialmente convierten nitrógeno orgánico en amoníaco y amonio (amonificación) (Kadlec & Wallace, 2009). Por esta diversidad de efectos, la cámara séptica logra un pretratamiento eficaz.

Figura 1. esquema de cámara séptica



Fuente: (Tilley, Ulrich, Lüthi, Reymond, & Zurbrügg, 2018)

Una cámara séptica debería tener por lo menos dos cámaras separadas, un volumen entre 200-300 L/HE (Habitantes Equivalentes) y un tiempo de retención hidráulica (TRH) de 2 días como mínimo. Una buena cámara séptica puede lograr eliminaciones de sustancias problemáticas en un rango de 80-90 % de DBO₅, DQO y STS. Los lodos que se acumulan en el fondo de la cámara deben ser retirados regularmente según necesidad, en un período de unos pocos años (Nguyen & Pham, 2007).

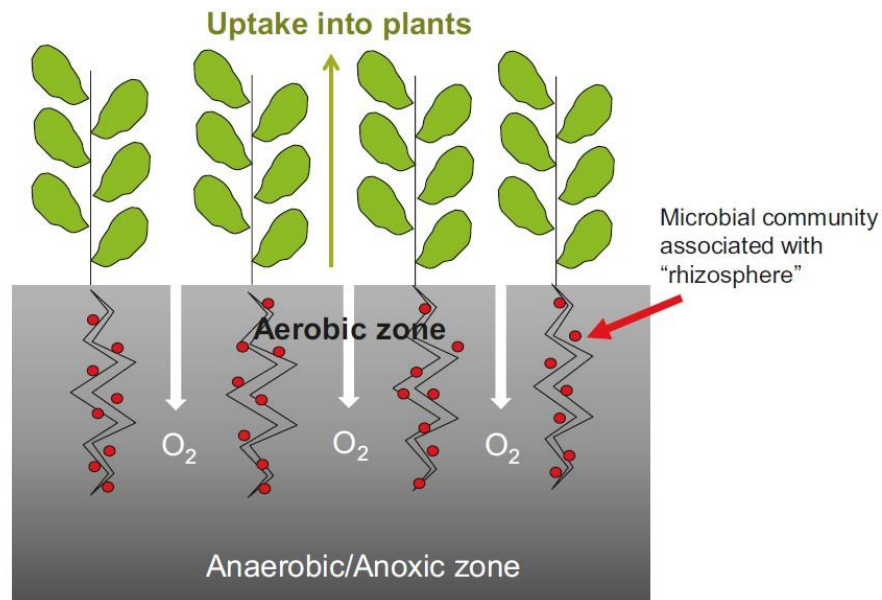
2.2. Fitodepuración

Las plantas de tratamiento por fitodepuración son sistemas diseñados especialmente para imitar una o más de las funciones de los humedales naturales. Los humedales artificiales incluyen humedales de flujo superficial, que imitan los humedales inundados naturales, o humedales de flujo subsuperficial donde el flujo pasa a través de un lecho de medios (también: sustrato) en el que se establecen las plantas y microorganismos.

En humedales de flujo subsuperficial, los tiempos de detención son típicamente entre 1 - 2 días y como se ilustra en la Figura 2, los microorganismos funcionales se asocian con las superficies del sustrato y con los sistemas de raíces (la rizosfera) de las plantas establecidas en el sustrato. El sustrato poroso también actúa como un filtro para reducir los niveles de sólidos en suspensión. Tanto en el flujo superficial como en los humedales de flujo subsuperficial, las plantas funcionan para oxigenar las capas superficiales de los sedimentos y de ese modo proporcionan un ambiente aeróbico para

la actividad microbiana. En algunos casos, las plantas pueden acumular e incorporar nutrientes (por ejemplo, fósforo) y contaminantes (por ejemplo, metales) del sustrato circundante o del agua (Nagabhatla & Metcalfe, 2018; Stottmeister, 2003).

Figura 2. Funciones de comunidades vegetales y microbianas en humedales naturales y construidos con flujo subsuperficial



Fuente: (Nagabhatla & Metcalfe, 2018).

Sin embargo, la comprensión de los procesos complejos causados por las plantas, los microorganismos, la matriz del suelo, las sustancias en los efluentes, y la forma en que todos ellos interactúan entre sí, sigue siendo bastante incompleta. El suministro de oxígeno y el tipo de metabolismo que realizan los microorganismos en la zona de la raíz juega un papel crucial en la actividad. La participación de las plantas en la entrada de oxígeno en la zona de la raíz, en la absorción de nutrientes y en la degradación directa de contaminantes, así como los microorganismos, juegan un rol muy importante en el funcionamiento de los humedales construidos (Stottmeister, 2003).

Tabla 2: especies de plantas aptas para el uso en fitodepuraciones

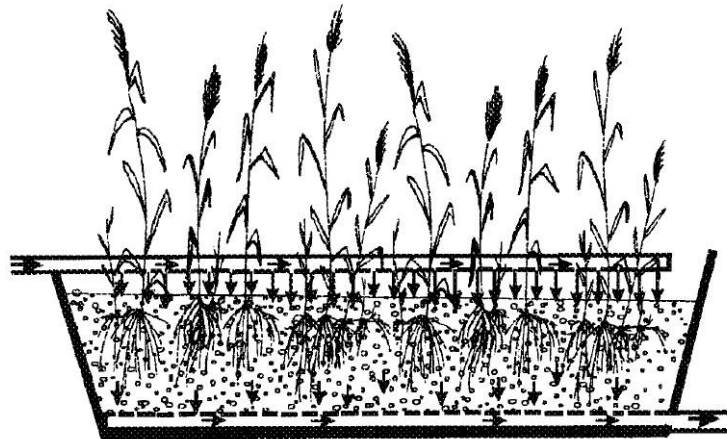
NOMBRE CIENTÍFICO	NOMBRE EN ESPAÑOL
PHRAGMITES AUSTRALIS	Carrizo
JUNCUS SPP.	Junco
SCIRPUS SPP.	<u>Scirpus</u>
TYPHA ANGUSTIFOLIA L.	Totora, espadaña, anea
TYPHA LATIFOLIA L.	Totora, junco de esteras, espadaña, enea, anea', Bayón, bayunco, maza de agua, entre otros
IRIS PSEUDACORUS L.	Lirio amarillo
ACORUS CALAMUS L.	Cálamo aromático
GLYCERIA MAXIMA	Hierba de caña
CAREX SPP.	juncia

Fuente: (Stottmeister, 2003)

Las plantas comunes para fitodepuraciones se especifican en la tabla 2, la adaptación de las mismas al sistema de fitodepuración y las condiciones locales forman parte de la investigación a realizar. El efluente pre-tratado que ingresa a la fitodepuración no debería tener metales pesados en concentraciones problemáticas, sin embargo, las plantas pueden acumularlos, por tanto, es objeto de la investigación estudiar la acumulación de metales pesados en las plantas.

El rendimiento del tratamiento varía con la concentración de contaminantes del efluente de entrada y las condiciones ambientales (estación y temperatura). Para medir el grado de purificación del efluente, se comparan los parámetros fisicoquímicos a la entrada y a la salida de la fitodepuración. Los parámetros de interés son: Sólidos Totales Suspendidos (STS), Demanda Química de Oxígeno (DQO), Demanda Biológica de Oxígeno (DBO), Nitrógeno total Kjeldahl, Nitrógeno de Amonio, Fósforo Total, entre otros (Kadlec & Wallace, 2009, pág. 163 seg). El tratamiento por fitodepuración genera un efluente final que cumplimenta las normativas de vertimiento de aguas residuales (Ley Provincial 11.220 Gobierno de Santa Fe, 1994). En la literatura se encuentran rendimientos de purificación de efluentes cloacales de 95.6 % (± 3.6) para STS (>80 % en la cámara séptica), > 90 % para DQO y DBO₅ y 99 % eliminación de bacterias (Merlin, Pajean, & Lissolo, 2002). Otros resultados muestran una reducción de 94 % de DQO, 95 % de DBO₅, 84 % de STS, 86 % de Nitrógeno de Amonio, 60 % de nitrógeno total y 94 % de fósforo total (Masia & Martinuzzi, 2007). Se ha descubierto que algunas plantas de los humedales acumulan metales pesados en sus tejidos a 100.000 veces la concentración que se encuentra en el agua circundante (WWAP , 2018, pág. 68).

Figura 3: fitodepuración de filtración vertical



Fuente: (Stottmeister, 2003)

2.3. Coagulación y Floculación

El objetivo de la coagulación, floculación y sedimentación es convertir sustancias disueltas (iones) en partículas irresueltas que se puedan separar por sedimentación y/o filtración (véase **Figura 4**).

Figura 4: Experimentos de coagulación / floculación / sedimentación



Fuente: Prozesstechnik¹

¹ <https://prozesstechnik.industrie.de>

La coagulación se define como la desestabilización por neutralización de carga de partículas y agregación inicial de coloides. La floculación es la aglomeración de material suspendido coloidal y finamente dividido coagulado ya sea por mezcla física o por coagulantes químicos auxiliares. Los coagulantes más efectivos son los iones metálicos divalentes y trivalentes, generalmente hierro y aluminio, pero pueden incluir calcio, magnesio y manganeso. Las otras sustancias que se pueden usar como coagulantes son polímeros y salmueras. Más comúnmente, las formas de los precipitantes son hidróxidos, carbonatos, fosfatos y sulfuros. (Russell, 2006).

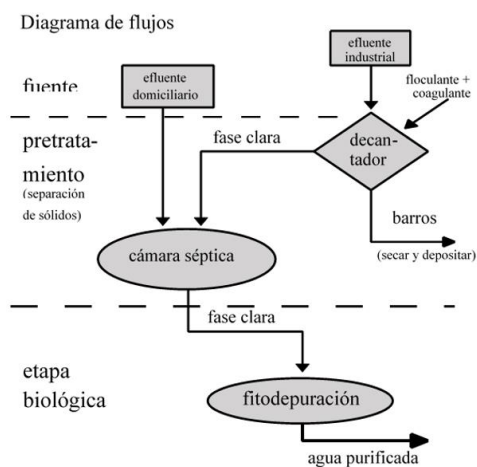
3. Ejecución y desarrollo del proyecto

Este proyecto surge como inquietud del grupo de investigación (en la línea de energías renovables y medio ambiente) de la Universidad Nacional de Rafaela (UNRaf) y a partir de la necesidad de una empresa local metalúrgica PyME de adecuarse a la normativa, para encontrar una solución en el tratamiento de sus efluentes.

La empresa genera efluentes cloacales e industriales que provienen de los procesos de producción. Los efluentes industriales derivan mayormente de la preparación de chapas para la pintura, en particular de los baños de desengrase y de fosfatación. La proporción de aguas residuales cloacales a industriales en promedio es 10 : 1. La empresa tiene alrededor de 35 empleados y se encuentra mudándose a una nueva planta dentro del Parque de Actividades Económicas Rafaela (PAER) en el momento de la redacción de este artículo. El parque no cuenta con sistema de recolección de desagües cloacales, por tal motivo la empresa decidió construir una fitodepuración con cámara séptica cómo pretratamiento para la línea de los efluentes cloacales.

En colaboración con el equipo de la UNRaf y un ingeniero externo, se planificó el diseño de la cámara séptica y el dimensionamiento de la laguna. Se realizó la construcción de la cámara, las conexiones correspondientes y la colocación de la bomba que envía el efluente desde la cámara hacia la fitodepuración. La próxima etapa consiste en la construcción de la laguna de 25 m² y una profundidad de un metro. Luego, se pondrá en marcha el sistema y se monitoreará el funcionamiento.

Figura 5: Diagrama de flujos



Fuente: diseño propio

La segunda etapa del proyecto consiste en el desarrollo y diseño de un tratamiento físico-químico para los efluentes industriales de la producción metalúrgica. El mecanismo que se pretende investigar con prioridad será una precipitación química con la ayuda de un agente coagulante. Los contaminantes disueltos con la añadidura de un coagulante se convierten en sólidos y sedimentan al fondo del tanque donde se puede separar el lodo, que contiene la gran parte de los polutantes. El tanque está diseñado de forma cónica con una salida en la punta baja para sacar los sedimentos. Se investigarán posibilidades de reutilización del lodo secado. Para elegir adecuadamente el coagulante y ajustar la cantidad óptima, el grado de mezcla y el tiempo de contacto en el tanque, se realizarán experimentos de precipitación previos a la implementación (véase 2.3 **Coagulación y Floculación**). El agua que egresa del pretratamiento, se envía a la cámara séptica junto con los efluentes cloacales y circula tanto por el proceso de sedimentación como por la fitodepuración (**Figura 5**). Equivalente a la primera etapa, se monitoreará y controlará el rendimiento del tratamiento.

El equipo de la UNRaf analizará el rendimiento y funcionamiento de la purificación global en el transcurso de varias estaciones del año para evaluar la influencia de la temperatura al metabolismo de las plantas y la microbiología. Se monitorearán parámetros del agua purificada como pH, conductividad, DQO, DBO₅, nitrógeno y fósforo total, STS y arsénico. La UNRaf se encargará de las tomas de muestras y la correspondiente medición de los parámetros físico-químicos. Los parámetros que no se puedan medir por parte de la UNRaf se derivarán a un laboratorio externo. Los datos se analizarán y se evaluarán para ganar un profundo conocimiento de la tecnología y asegurar el cumplimiento de los límites que establece la ley para el vertimiento de efluentes. Se publicarán los resultados y las experiencias en artículos científicos y se proyecta la participación en conferencias relacionadas con el tema.

En todo el desarrollo del proyecto se comprobará el cumplimiento de los límites legales de vertimiento de aguas servidas. Todos los datos obtenidos serán sistematizados en una base de datos que servirán de insumo para generar información relevante respecto al monitoreo. Esta información será analizada periódicamente y será la base para obtener conclusiones relevantes respecto de este método de purificación.

La cooperación entre la UNRaf y la empresa local se consolidó con la firma de una carta de intención entre la Universidad y la PyME para lograr “una vinculación tecnológica formal para llevar a cabo investigaciones y transferir desarrollos tecnológicos”. Asimismo, se articula con instituciones locales públicas como la Asociación Civil para el Desarrollo y la Innovación Competitiva Rafaela (ACDICAR) a través de la firma de una carta de aval, donde se “manifiesta el apoyo al proyecto como institución adoptante”.

Además, esta Asociación hace explícito el interés de aplicar los resultados que se obtengan en el marco del presente proyecto para fomentar el desarrollo y la innovación competitiva de las industrias metalúrgicas regionales.

La búsqueda de financiación forma parte del trabajo del equipo. En ese sentido, se participó en la convocatoria “Producción más limpia” del Fondo Tecnológico Argentino (FONTAR), quedando seleccionado este proyecto para su financiación. Esto demuestra

la importancia de la temática y su potencial desarrollo en la región. Con estos fondos se podrá ejecutar la planta de fitodepuración y realizar la investigación pertinente en cuanto al monitoreo de la tecnología.

Figura 6: Fotos de la construcción de la cámara séptica en el PAER Rafaela



Fuente: fotos propias

El grupo de investigación de la UNRaf lleva un año de formación y se encuentra investigando y ejecutando varias temáticas relacionadas con Energía Renovable y Medio Ambiente con instituciones y empresas locales para llevar adelante la innovación y el desarrollo tecnológico. Actualmente realiza proyectos de investigación de biogás a partir de la Fracción Orgánica de Residuos Sólidos Urbanos (FORSU), generación de energía renovable con fuente fotovoltaica, gestión de residuos, instalación e investigación de colectores solares para el abastecimiento de agua caliente para la cantina de la universidad, análisis de consumo energético de instituciones públicas e investigaciones de producción de biogás con dos biodigestores a escala laboratorio. También se ejecutan actividades académicas, como la apertura (abril 2018) de una Diplomatura en Energías Renovables y Eficiencia Energética, participando como docentes. La propuesta fue recibida con mucha aceptación superando ampliamente el cupo de inscriptos previsto.

4. Conclusiones y Lecciones

El informe de las Naciones Unidas con el título “Soluciones Basadas en la Naturaleza para la Gestión del Agua” (WWAP , 2018) muestra la actualidad internacional de proyectos como el presente en cuestiones de la protección del agua limpia. El grupo de investigación de la UNRaf, considera la fitodepuración como una solución muy prometedora para las problemáticas existentes en Rafaela y la región,

respecto al tratamiento de efluentes. La amplia aplicación de la tecnología de fitodepuración para muchos tipos de efluentes, la construcción con materiales accesibles y económicos, así como la robustez del proceso, denotan el gran potencial de esta tecnología. El obstáculo que los autores consideran de la tecnología, es la falta de experiencias concretas. Se observa la importancia de tener una planta modelo en funcionamiento en la región para aumentar el conocimiento, la confianza y el atractivo de esta posibilidad de purificar efluentes y agregar una opción más al catálogo de tratamientos disponibles. La zona donde se encuentra Rafaela, presenta un amplio sector productivo con empresas que desarrollan productos lácteos, frigoríficos, metalúrgicas y una gran actividad ganadera y agrícola. Cada una de estas actividades generan efluentes con altas cargas orgánicas, para lo cual, la fitodepuración puede ser una alternativa interesante para el tratamiento de los mismos. Además, la tecnología se puede aplicar para tratar efluentes cloacales domiciliarios desde una familia hasta todo un barrio o una ciudad de manera centralizada o descentralizada.

A la fecha, el proyecto se encuentra en el medio de su etapa de construcción. En colaboración, el grupo académico y la PyME se presentaron en la convocatoria mencionada en el párrafo anterior, la misma fue aprobada y los fondos comenzaran a ejecutarse en los próximos meses. De todos modos, la UNRaf y la empresa continúan su colaboración tanto en la construcción y el monitoreo de la fitodepuración, como en el diseño del tratamiento químico de los efluentes. Se espera la finalización y puesta en marcha de la línea de efluentes cloacales a finales de 2018. El diseño del pretratamiento químico de la línea industrial requiere experimentos previos con los aditivos para investigar los parámetros: cantidad de aditivo, mezcla, tiempo de contacto y sedimentación. Como primera prioridad se tiene la finalización de la línea cloacal, sin embargo, se proyecta terminar las dos líneas hacia principio de 2019. La investigación sobre el funcionamiento de la purificación está prevista para dos años a partir de su finalización. Luego de la etapa de construcción, se analizarán las posibilidades de reutilización de los lodos producidos del pretratamiento químico y se investigará la acumulación de sustancias peligrosas como metales pesados en las plantas de la laguna. De acuerdo a los resultados obtenidos se desarrollará alternativas de tratamientos, reúsos o posibilidades de deposición segura.

La perspectiva del grupo de investigación, a partir de este trabajo, es poner a punto la tecnología de fitodepuración en la zona de Rafaela y la región y divulgar este proceso como alternativa para el tratamiento de efluentes. Alcanzar los niveles de depuración requeridos por la normativa provincial para el vuelco de efluentes, así como optimizar el proceso a partir del estudio e investigación de la tecnología, son dos ejes fundamentales de este trabajo. Así mismo, y en consonancia con los lineamientos de la Universidad Nacional de Rafaela, es un desafío para el grupo consolidar los vínculos con las empresas locales y poder ofrecer respuestas tecnológicas para la resolución de problemas relacionados al Medio Ambiente y la Energía a nivel local y territorial.

Referencias Bibliográficas

- Abdel-Shafya, H. I., & El-Khateeb, M. A. (2012). Integration of septic tank and constructed wetland for the treatment of wastewater in Egypt. *Desalination and Water Treatment*, 9.
- Aguas Santafesinas. (16 de Abril de 2018). <https://www.aguassantafesinas.com.ar/portal/quienes-somos/rafaela/>. Obtenido de <https://www.aguassantafesinas.com.ar/portal/quienes-somos/rafaela/>
- Corroto, C., Calderón, E., Pérez Carrera, A., & Fernández Cirrelli, A. (2016). Remoción de Arsénico por Fitorremediación. *Memorias de la III Conferencia Panamericana de Sistemas de Humedales*, 2.
- Fernández González, J. (sin año). *Manual de Fitodepuración - Filtros de macrofitas en flotación*. Madrid: Catedrático de Producción Vegetal. Universidad Politécnica de Madrid.
- Gomez-González, A. (2011). *Cubiertas planas fitodepuradoras - Propuesta de gestión de aguas grises en altura*. Madrid, España: Informes de la Construcción, Vol. 63, EXTRA, 61-71.
- González, J. (18 de Abril de 2018). *Madri+d*. Obtenido de <http://www.madrimasd.org/informacionIdi/analisis/analisis/analisis.asp?id=25006>
- Hadad, H. R., & Maine, M. A. (2016). MEMORIAS DE LA III CONFERENCIA PANAMERICANA DE SISTEMAS DE HUMEDALES PARA EL TRATAMIENTO Y MEJORAMIENTO DE LA CALIDAD DEL AGUA. *III Conferencia Panamericana de Sistemas de Humedales para el Tratamiento y Mejoramiento de la calidad del Agua*, (pág. 164). Santa Fe, Argentina.
- Hadad, H., Mufarrege, M., Di Luca, G., & Maine, M. (2009). Morphological Response of *Typha domingensis* to an Industrial Effluent Containing Heavy Metals in a Constructed Wetland. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology, Springer Science+Business Media*, 11.
- INDEC. (2010). *Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas*. Buenos Aires: Instituto Nacional de Estadística y Censos.
- Kadlec, R. H., & Wallace, S. D. (2009). *Treatment Wetlands - 2nd ed*. Boca Raton (USA): CRC Press - Taylor & Francis Group.
- Krüger, T., & Holländer, H. (2006). Laborversuche zur in-situ Immobilisierung von Arsen., (pág. 1). Hannover (Alemania).
- Ley Provincial 11.220 Gobierno de Santa Fe. (1994). *Ley Provincial 11.220 - Prestación y regulación de los servicios sanitarios*. Obtenido de Santa Fe: <https://www.santafe.gov.ar/index.php/web/content/view/full/9563>
- Maine, M.A., et al. (2016). Long-term performance of two free-water surface wetlands for metallurgical effluent treatment. *Ecological Engineering*, 6.
- Mara, D. (1976). *Aguas Residuales y Tratamiento de Efluentes Cloacales*. Anexo IX.

- Masia, F., & Martinuzzi, N. (2007). Constructed wetlands for the Mediterranean countries: hybrid systems for water reuse and sustainable sanitation. *Desalination No. 215*, 12.
- Merlin, G., Pajeau, J.-L., & Lissolo, T. (2002). Performances of constructed wetlands for municipal wastewater treatment in rural mountainous area. *Hydrobiologia (Volume 469)*, 12.
- Metcalf, & Eddy. (1996). *Tratamientos Avanzados de Agua Residual*. California: McGraw- Hill.
- Ministerio de Industria. (16 de 4 de 2018). <http://parques.industria.gob.ar/dparques/19/parque-de-actividades-economicas-de-rafaela.html>. Obtenido de <http://parques.industria.gob.ar/dparques/19/parque-de-actividades-economicas-de-rafaela.html>
- Nagabhatla, N., & Metcalfe, C. (2018). *Multifunctional Wetlands - Pollution Abatement and Other Ecological Services from Natural and Constructed Wetlands*. Cham, Suiza: Springer International Publishing AG.
- Nguyen, A. V., & Pham, N. T. (2007). Improved septic tank with Constructed Wetland, a promising decentralized wastewater treatment alternative in Vietnam. *NOWRA 16th Annual Technical Education Conference & Exposition*, 17.
- Pröter, J. (2007). *Reinigung von arsenhaltigen Wässern in bepflanzten Bodenfiltern*. Leipzig (Alemania): Institute for Energy and Environment.
- Russell, D. L. (2006). *Practical Wastewater Treatment*. New Jersey (USA): A John Wiley & Sons, Inc., Publication.
- Schierano, M. A., Laorden, F., & Aimo, C. (sin año). *Mapa de Arsénico de la Zona Oeste de la Provincia de Santa Fe*. Rafaela: Universidad Tecnológica Nacional. Facultad Regional Rafaela.
- Sigfried, K., & Hahn-Tomer, S. (2015). *Introducing Simple Detection of Bioavailable Arsenic at Rafaela (Santa Fe Province, Argentina) Using the ARSOLux Biosensor*. Leipzig: International Journal of Environmental Research and Public Health.
- Stottmeister, U. (2003). *Effects of plants and microorganisms in constructed wetlands for wastewater treatment*. Leipzig, Alemania: UFZ Centre for Environmental - Elsevier Inc.
- Tilley, E., Ulrich, L., Lüthi, C., Reymond, P., & Zurbrügg, C. (23 de Abril de 2018). *The online Compendium of Sanitation Systems and Technologies*. Obtenido de http://ecompendium.sswm.info/sanitation-technologies/septic-tank?group_code=s
- WHO / OMS, W. (2011). *Guidelines for drinking-water quality - 4th edition*. Suiza: Ginebra.
- WWAP, T. N.-B. (2018). *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2018: Soluciones basadas en la naturaleza para la gestión del agua*. Paris: UNESCO.

