

**ESTUDIO DEL MÉTODO DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES NO
URBANAS PROVENIENTES DE LA INDUSTRIA PROCESADORA DE
GUAYABA UTILIZANDO PLANTAS NATIVAS COLOMBIANAS.**

DORIS PATRICIA VELANDIA RIVERA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE QUIMICA
MAESTRÍA EN QUIMICA AMBIENTAL
BUCARAMANGA**

2015

**ESTUDIO DEL MÉTODO DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES NO
URBANAS PROVENIENTES DE LA INDUSTRIA PROCESADORA DE
GUAYABA UTILIZANDO PLANTAS NATIVAS COLOMBIANAS.**

DORIS PATRICIA VELANDIA RIVERA

**Trabajo de grado para optar el título de
Magister en Química Ambiental**

Director

CARLOS JESUS MUVDI NOVA

Ing. Químico, M.Sc., Ph.D.

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE CIENCIAS

ESCUELA DE QUIMICA

MAESTRÍA EN QUIMICA AMBIENTAL

BUCARAMANGA

2015

TABLA DE CONTENIDO

<u>INTRODUCCIÓN</u>	11
<u>1. HIPÓTESIS</u>	15
<u>2. OBJETIVOS</u>	16
<u>3. ESTADO DE ARTE Y MARCO TEÓRICO</u>	17
<u>4. METODOLOGIA</u>	24
<u>5. DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS</u>	28
5.1 SELECCIÓN Y RECOLECCIÓN DE PLANTAS	28
5.2 ETAPA DE ADAPTACIÓN DE PLANTAS.....	30
5.3 ETAPA DE FABRICACIÓN DEL PROTOTIPO.....	30
5.4 EXPERIMENTOS REALIZADOS PARA EL SEGUIMIENTO DE LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICOQUÍMICAS Y MICROBIOLÓGICAS DEL AGUA RESIDUAL EN EL TRATAMIENTO.....	31
5.5 COMPORTAMIENTO EN EL TIEMPO DE LOS PRINCIPALES FACTORES QUE AFECTAN EL TRATAMIENTO.....	31
5.6 CUMPLIMIENTO DE LA NORMATIVIDAD DE VERTIMIENTO DE AGUAS RESIDUALES	40
5.7 CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑO DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES	41
<u>6. CONCLUSIONES</u>	47

7. RECOMENDACIONES.....49

BIBLIOGRAFIA.....50

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Plantas acuáticas emergentes utilizadas en tratamiento de aguas residuales.	21
Tabla 2. Análisis fisicoquímicos seleccionados para la caracterización de aguas en la presente propuesta.	27
Tabla 3. Clasificación taxonómica de plantas recolectadas.	29
Tabla 4. Fechas de la recolección de plantas.	29
Tabla 5. Relación entre DBO:N:P con los datos obtenidos en la experimentación.	38
Tabla 6. Valores de variables utilizadas en la determinación del área superficial.	43
Tabla 7. Materiales de construcción del humedal.	45

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema típico de un sistema de humadales de flujo superficial. Fuente: Arm, 2011	19
Figura 2. Esquema de un humedal A. Flujo horizontal subsuperficial. B. Flujo vertical subsuperficial. Fuente: Arm, 2011	19
Figura 3. Fotografías de las plantas seleccionadas: A. Pennisetum purpureum. B. Panicum máximum. C. Arundo donax. D. Gynerium sagytattum.	28
Figura 4. Recolección de plantas a orillas de ríos.....	29
Figura 5. Etapa de adaptación al medio granular.	30
Figura 6. Prototipos utilizados durante la experimentación (blanco y piloto)	31
Figura 7. Variación del pH durante la experimentación en el Blanco y Piloto.	32
Figura 8. Volumen de agua (sin cloro) adicionada en el Blanco y Piloto durante la prueba.....	33
Figura 9. Temperatura máxima durante el periodo de experimentación.....	34
Figura 10. Seguimiento de la DBO en el Blanco y Piloto.	35
Figura 11. Seguimiento de la DQO en el Blanco y Piloto.....	35
Figura 12. Seguimiento del contenido de Nitrógeno total en el Blanco y Piloto.	36
Figura 13. Seguimiento del contenido de Fósforo (P) en el Blanco y Piloto.	37
Figura 14. Seguimiento del contenido de Turbidez en el Blanco y Piloto.	38

Figura 15. Apariencia del agua recogida durante la etapa de experimentación en el piloto. (A) Agua al lavar el piloto. (B) Agua al día siguiente del lavado. (C) Agua después de 15 días formación fase oleosa. (D) Óxido de hierro formado en la tubería.....	39
Figura 16. Seguimiento Sólidos disueltos en el Blanco y Piloto.....	40
Figura 17. Comparación entre las temperaturas máximas de los municipios de San Gil y Vélez.....	42
Figura 18. Representación de Ln de la concentración de DBO y DQO vs tiempo.	42
Figura 19. Propuesta para diseño del humedal en la planta procesadora de bocadillo.....	45
Figura 20. Corte transversal de la vista superior del diseño del humedal.	46

TÍTULO: ESTUDIO DEL METODO DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES NO URBANAS PROCEDENTES DE LA INDUSTRIA PROCESADORA DE GUAYABA UTILIZANDO PLANTAS NATIVAS COLOMBIANAS¹.

AUTOR: Doris Patricia Velandia Rivera².

PALABRAS CLAVES: Aguas residuales, humedal, guayaba, *Gynerium Sagitatum*.

DESCRIPCIÓN:

En esta propuesta se realizó un estudio experimental para determinar la viabilidad del tratamiento de aguas residuales provenientes de la industria procesadora de guayaba, utilizando para ello un piloto en la configuración de humedal horizontal de flujo subsuperficial, utilizando la planta *Gynerium Sagitatum* y como soporte grava y arena.

Al caracterizar el agua residual alimentada el sistema se obtuvo una concentración inicial para la DBO de 1400 mg/L, para la DQO 5800 mg/L y un pH de 4,1. El tratamiento permitió alcanzar en los primeros 15 días, una DBO de 350 mg/L y una DQO de 600 mg/L. Estos valores coinciden con la norma establecida por la resolución 631 del 17 de marzo de 2015, que entrará en vigencia a partir del 1 de enero de 2016.

Los resultados obtenidos para el tratamiento por medio de plantas nativas (*Gynerium Sagitatum*), sería viable para ser utilizado en el tratamiento de aguas residuales provenientes en la industria del bocadillo, en las condiciones climáticas de Vélez, requiriendo un espacio de 1470 m² para el tratamiento de 14,28 m³/día de efluente. Este tipo de tratamiento traería para la empresa varios beneficios a nivel ambiental y social, como la reducción de las concentraciones de contaminantes liberados y el mejoramiento del entorno.

¹. Trabajo de grado.

². Facultad de Ciencias, Escuela de Química, Maestría en Química Ambiental

Director: Carlos Jesus Muvdi Nova.

ABSTRACT

TITLE: STUDY OF METHOD OF TREATMENT OF URBAN WASTE WATER NOT FROM GUAVA PROCESSING INDUSTRY USING NATIVE PLANTS COLOMBIAN¹.

AUTHOR: DORIS PATRICIA VELANDIA RIVERA².

KEY WORDS: Wastewater, wetland, guava, *Ginerium Sagitatum*.

DESCRIPCION:

In this work an experimental research was conducted to determine the feasibility of treating wastewater from the guava processing industry. For this purpose a pilot was constructed in horizontal subsurface flow wetland configuration by using *Gynerium Sagitatum*, and gravel and sand as support.

When characterized, the wastewater fed to the systems showed an initial concentration of 1,400 mg/L for the Biochemical oxygen demand (BOD), 5,800 mg/L for the Chemical oxygen demand (COD), and a pH of 4.1. For the first 15 days, the treatment allowed to reach a BOD of 350 mg/L and a COD of 600 mg/L. These values agree with Colombian Resolution 631 of March 17th, 2015 which will take effect starting on January 1st, 2016.

The obtained results for the treatment of wastewater by means of native plants such as *Gynerium Sagitatum* would be viable in the wastewater treatment coming from the *bocadillo* industry under climatic conditions of Velez. The required surface for treatment of 14.28 m³/day of effluent is 1,470 m². This type of treatment would bring several benefits to the company at both environmental and social level, including the reduction of released pollutants concentrations and the surroundings improvement.

¹. Thesis.

². Science Faculty, Chemistry School, .MSc.
Environmental Chemistry.
Advisor: Carlos Jesus Muvdi Nova.

INTRODUCCIÓN

En Colombia, la industria alimentaria y de bebidas participa activamente en la contaminación de las fuentes hídricas del país, con un aporte diario aproximado en residuos de 688 toneladas de materia orgánica e inorgánica. Estas cifras deben ser minimizadas, con el fin de proteger nuestros ecosistemas y fauna. Dentro de las industrias alimenticias, se encuentran las pequeñas industrias (muchas de carácter familiar), las cuales no cuentan con procesos que disminuyan, parcialmente o totalmente, los residuos líquidos generados; siendo estos vertidos al alcantarillado (si cuentan con alguno cercano) o directamente a fuentes de agua. Esto genera gran contaminación de los ríos y de suelos por infiltración. Dentro de este tipo de empresas familiares se encuentra la del bocadillo tradicional de guayaba, la cual se ha desarrollado desde hace más de un siglo. Para el caso específico de la región de Santander (131 empresas, Rodríguez & Rangel, 2005), sólo las fábricas ubicadas en el municipio de Barbosa están conectadas a la red de alcantarillado del municipio; las demás fábricas no cuentan con sistemas de tratamiento, arrojando sus aguas residuales a campo abierto y algunas directamente a fuentes hídricas. Debido a la gran importancia de esta industria, la presente propuesta se enfocó en el tratamiento de los residuos líquidos generados por ésta. Se planteó el uso de un proceso biológico que ha demostrado su capacidad y potencial para el tratamiento de aguas residuales, utilizando plantas nativas de nuestro país, en regiones donde no se dispone de un sistema de tratamiento de aguas urbano.

En Europa, se ha logrado de manera efectiva la descontaminación de aguas provenientes de diferentes industrias y pequeñas municipalidades, que no poseen un sistema de tratamiento de aguas urbano, utilizando plantas nativas (Montoya, 2010).

En lo que respecta a nuestro país, la depuración de aguas residuales con la utilización de macrófitas (plantas acuáticas) está todavía poco investigada, aunque ya se ha reconocido su gran eficacia. Parece una forma económica de ayudar a

tratar y recuperar las aguas residuales para, por ejemplo, regadío o simplemente para depurar las aguas antes de su desembocadura en el mar (Pérez & Rojo, 2000). En Colombia, tenemos como ejemplo: los humedales artificiales que se han implementado en Bogotá para proteger los humedales naturales, evitando que llegue gran cantidad de contaminantes (Peña & Lara, 2012) y los humedales de alta tasa ubicados en Caño Gandul (Casanare) para el tratamiento de aguas domésticas (Otálora, 2011).

El aporte de esta propuesta consistió en evaluar la aplicabilidad de esta tecnología como estrategia para disminuir la carga orgánica de efluentes resultantes de actividades de procesamiento de alimentos, a través de la selección de variedades vegetales nativas, que permitan la fitorremediación bajo condiciones ambientales locales. Esta propuesta, enfocó su estudio en el tratamiento de aguas residuales provenientes de la industria procesadora de guayaba en Vélez, y el desarrollo experimental se realizó en San Gil, Santander.

1. HIPÓTESIS

Es posible tratar aguas residuales provenientes de la industria procesadora de guayaba por fitorremediación utilizando plantas nativas colombianas.

2. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Analizar la aplicabilidad del método de tratamiento de aguas residuales no urbanas utilizando plantas nativas colombianas como estrategia para disminuir el impacto ambiental de industrias procesadoras de guayaba.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar especies vegetales nativas que tengan la capacidad de remover rápidamente contaminantes provenientes de efluentes de la industria procesadora de guayaba.
- Establecer el comportamiento en el tiempo de los principales constituyentes de aguas residuales provenientes de la industria procesadora de guayaba, a través de ensayos utilizando una especie vegetal nativa.
- Determinar la viabilidad del método estudiado como estrategia para disminuir el impacto ambiental de industrias procesadoras de guayaba, ubicadas en la zona específica de Vélez.

3. ESTADO DE ARTE Y MARCO TEÓRICO

La fitorremediación se puede definir como la limpieza de contaminantes mediada principalmente por las plantas fotosintéticas (Terry, 2000). Dentro de los procesos que participan durante la remediación se incluyen procesos biológicos, químicos y físicos, que ayudan en la absorción, el secuestro y la transformación (degradación) de los contaminantes; ya sea por plantas o por los organismos vivos libres que constituyen la rizosfera de la planta (Suthersan, 2001).

Este tipo de tratamiento está fundamentado, en el uso de humedales artificiales, los cuales se pueden utilizar para el tratamiento primario (proceso de asentamiento de los sólidos), secundario (descomposición del contenido biológico de las aguas residuales) y terciario (proceso de desinfección o microfiltración) (Carrión, 2008) de aguas residuales municipales o domésticas, aguas pluviales y aguas residuales agrícolas e industriales (petroquímica, papel, minería, alimentos) (Pipelin, 2000).

Estos tratamientos son utilizados en Europa y se convierten en una opción para tratar las aguas residuales especialmente en comunidades pequeñas de escasos recursos y apartadas dentro del territorio nacional (Montoya *et al.*, 2010). Varios estudios han demostrado la eficacia global de los humedales construidos en el tratamiento de las aguas residuales municipales (Akratos & Tsihrintzi, 2006).

Se han desarrollado estudios relacionados con la creación de humedales artificiales de flujo vertical (el flujo hidráulico es preferentemente vertical sobre el material filtrante), para mejorar la calidad del agua del río Bogotá, e inclusive su uso para el tratamiento de aguas residuales (Rodríguez & Ospina, 2005.)

Según los estudios en fitorremediación con humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales porcinas, los humedales artificiales al combinar

medios filtrantes y diferentes tipos de plantas se lograron remociones de DBO y SST (sólidos solubles totales) (Arias *et al.*, 2010), en las cantidades exigidas por el artículo 72 del Decreto 1594 de 1984 sobre el vertimiento en Colombia.

Parece que un tiempo de retención hidráulica de 8 días es suficiente para dar lugar a una eficiencia de eliminación aceptable de la materia orgánica (Kotti *et al.*, 2010).

En cada región se deben ensayar plantas de la zona, los medios filtrantes y los caudales de entrada con el fin de definir el mejor sistema. No existen sistemas estándar para todas las aguas residuales y para todas las zonas rurales de Colombia (Arias *et al.*, 2010).

En Caño Gandul (Casanare) existe un sistema de tratamiento de aguas residuales domésticas mediante humedales artificiales, en donde se utilizó la especie *Bidens laevis*, dando buenos resultados de porcentaje de remoción (DBO 89%, DQO 83% y los SST 87,5%). Este sistema, presenta varias ventajas frente a las lagunas de oxidación, puesto que ofrece mayor eficiencia de remoción, reducción de costos por menor demanda de terreno, no requiere mantenimiento continuo, ni demanda personal especializado para su operación (Otálora, 2011).

Dentro de los sistemas básicos de humedales basados en el suelo encontramos los Sistemas de Flujo Superficial (SFS) (ver Figura 1), en donde el nivel de las aguas residuales se encuentra por encima de la superficie del suelo (Stottmeister *et al.*, 2003), son poco profundos estando en contacto con el sedimento subyacente y se utilizan plantas emergentes (Nelson *et al.*, 2003). Éstos han dado un grado de pureza que podría conducir a una amplia aplicación del proceso (Kadlec & Wallace, 2008). El uso de los SFS, es extenso en América del Norte. Estos sistemas se utilizan principalmente para el tratamiento de aguas residuales municipales con grandes flujos de aguas residuales.

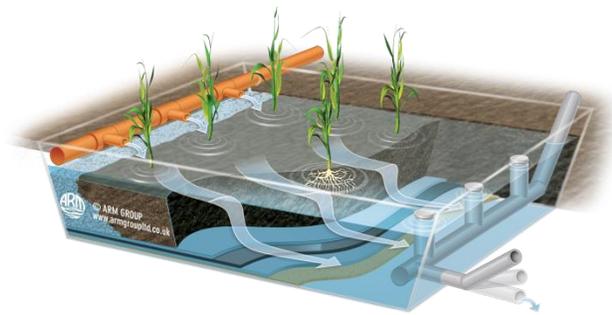


Figura 1. Esquema típico de un sistema de humadales de flujo superficial. Fuente: Arm, 2011

En los Sistemas de Flujo Subsuperficial (SFSS) el nivel de las aguas residuales se encuentra por debajo de la superficie del suelo, algunas de las ventajas que tienen frente a los SFS son: mínima presencia de plagas, ausencia de malos olores en la zona de los lechos, facilidad de operación. Los SFSS se clasifican en sistemas de Flujo horizontal (SSFH) (Figura 2 a) y los sistemas de flujo vertical (SSFV), que posee características ascendentes o descendentes (Figura 2 b). Los SSFH son los sistemas más utilizados en Europa (Delgadillo *et al.*, 2010).

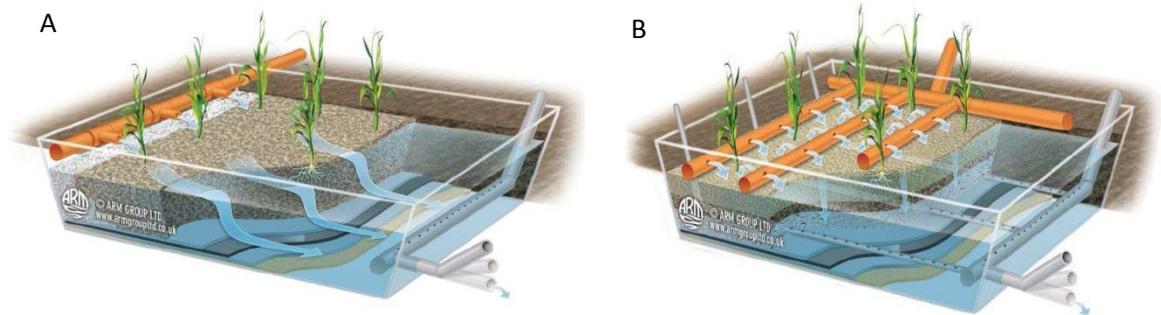


Figura 2. Esquema de un humedal A. Flujo horizontal subsuperficial. B. Flujo vertical subsuperficial. Fuente: Arm, 2011

En cuanto a las dimensiones de los humadales, Arias (2010) recomienda que se debe guardar una proporción largo: ancho (L:A) entre 3:1. La superficie del lecho debe ser llana y el fondo se recomienda que tenga una pendiente no mayor del 3% que permita que el agua residual fluya a través del substrato venciendo las fuerzas de fricción del medio (Steiner, 1993) (Cooper, 1993).

Para la remoción de materia orgánica, se utilizan plantas acuáticas (macrófitas). Montoya *et al.* (2010) realizó un estudio comparativo sobre la remoción de materia orgánica en humedales de flujo horizontal subsuperficial usando tres especies de macrófitas. Este trabajo concluye que los humedales de flujo subsuperficial plantados con cualquiera de las plantas *Canna limbata*, *Heliconia psittacorum* y *Phragmites sp*, pueden remover eficazmente materia orgánica de aguas residuales domésticas; aunque no se pudo encontrar cuál de estas especies fue la más eficiente durante el proceso de remoción. En general, se encontró que la remoción de DBO (97,5-100 %) fue mayor que la DQO (93,5-97,4 %). Los humedales de flujo sub-superficial horizontal se pueden usar en la reducción del contenido de materia orgánica de las aguas residuales de curtiembres (Calheiros, 2007)

En un sistema tropical, las plantas de los humedales tienen una mayor tasa de crecimiento, propagándose fácilmente. Esto ayuda a aumentar la capacidad de absorción de contaminantes por las plantas. Las especies de plantas, deben ser especies locales y ampliamente distribuidas en el país (Wetlands International, 2013). Todas las plantas utilizadas son perennes, por lo que la duración activa del filtro es ilimitada si se mantiene adecuadamente, principalmente si no falta el agua en los canales y se controlan las posibles plagas o enfermedades (Beascochea *et al.*, 2004)

La técnica del tratamiento de aguas residuales con plantas, es una excelente alternativa frente a los tradicionales métodos desarrollados por el hombre en los últimos años, presentando claras ventajas desde el punto de vista ambiental y económico y son opciones tecnológicas flexibles (Celis *et al.*, 2005) (Li, 2010).

En los humedales construidos se han utilizado una variedad de plantas emergentes semejantes a las encontradas en los humedales naturales. La función de mayor importancia de las macrófitas en relación con el proceso de tratamiento de las aguas residuales es el efecto físico que ellas producen estabilizando la superficie del lecho,

proporcionando buenas condiciones para la filtración, y en el caso de los sistemas con flujo vertical previniendo las obstrucciones, además de proporcionar área superficial para el crecimiento de los microorganismos (Rodríguez, 2003).

Las plantas emergentes tienen sus raíces en el suelo con las porciones basales que normalmente crecen por debajo de la superficie del agua, pero cuyas hojas, tallos (partes fotosintéticas), y órganos reproductivos son aéreos. Tal vez las especies emergentes más comunes se encuentran en las grandes familias de monocotiledóneas que tienden a dominar tanto en agua dulce y pantanos de agua salada. Entre estas podemos mencionar, la *Poaceae* (gramíneas), la *Cyperaceae* (juncos, por ejemplo, *Carex*, *Cyperus*), la *Juncaceae* (juncos) y la *Typhaceae* (totora). Otras especies emergentes frecuentemente encontradas son el *Alismataceae* (llantén de agua), *Araceae* (Arum), *Asteraceae* (aster), *Lamiaceae* (por ejemplo, *Lycopus*, *Mentha*), *Polygonaceae* (pimienta de agua), y *Sparganiaceae* (*bur reed*) (Cronk et al., 2001)

La Tabla 1 muestra algunas especies utilizadas en el tratamiento de aguas residuales.

Tabla 1. Plantas acuáticas emergentes utilizadas en tratamiento de aguas residuales.

Nombre común	Nombre Científico	Temperatura °C		Máxima salinidad	Rango Ph
		Deseable	Germinación semilla	Tolerancia ppmil	
Totora	<i>Thypha spp</i>	10-30	12-24	30	4-10
Caña	<i>Phragmites</i>	12-23	10-30	45	2-8
Común	<i>Communis</i>	16-26	NR	20	5-7,5
Junco	<i>Juncus spp</i>	18-27	NR	20	4-9
Junco	<i>Scirpus</i>	14-32	NR	NR	5-7,5
Caña de Castilla	<i>Arundo donax</i>	5-35	NR	NR	5,5- 8,3
Caña brava	<i>Gynerium sagittatum</i>	22-27	NR	NR	6-8,5

Fuente: Llagas & Guadalupe, 2006; Ditomaso, 1998.

El objetivo del proceso de selección de plantas es elegir una especie de planta con características adecuadas para el crecimiento bajo las condiciones del sitio y que cumpla con los objetivos de fitorremediación. Para la fitotransformación de compuestos orgánicos, los requisitos de diseño son que la vegetación crezca rápidamente, sea resistente, fácil de plantar y mantener, y que utilice una gran cantidad de agua por evapotranspiración (Suthersan, 2002).

Llagas & Guadalupe (2006) realizaron un trabajo referente al diseño de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales, como alternativa para el tratamiento en la Ciudad Universitaria de la UNMSM (Universidad Nacional Mayor de San Marcos) en Lima. En donde se determinó que la dimensión de las celdas para el diseño del humedal de la Ciudad Universitaria debe estar en relación largo:ancho de 4:1; relación influenciada fuertemente por el régimen hidráulico y la resistencia al flujo dentro del sistema. Relaciones desde 1:1 hasta 3:1 son también aceptables.

En Colombia, se han realizado algunos estudios utilizando plantas emergentes. En la actualidad, en el semillero de investigación en Humedales Artificiales para tratamiento de aguas residuales domésticas de la Universidad Nacional de Colombia (sede Manizales), se está trabajando en una línea de investigación enfocada a la evaluación del uso de grava y vasos desechables que actúan como sustratos y sirven para dar un mayor soporte y adherencia a raíces y a los microorganismos. Los sustratos usados comúnmente, son: suelo, arena, roca, y materiales orgánicos como el compost.

En Europa, el tratamiento de aguas residuales empleando humedales, ya se aplica en municipios de no más de 2 000 habitantes. Muchos de estos trabajos, han sido patentados o hacen parte de proyectos de desarrollo de empresas privadas en las que se utiliza la fitorremediación para el tratamiento de aguas residuales. Entre estas encontramos:

1. Macrófitas, S. L. (España), propietaria de la marca Hidrolution, fue constituida en 1999, económico procedimiento de depuración de aguas residuales denominado Filtro de Macrófitas en Flotación (FMF).
2. Termainox Consulting (España), creó el sistema de depuración de aguas residuales a través de plantas macrófitas.
3. ASEPMA (España), tiene patentado el sistema BABYLON® (Patente N° 2008/01210/7) la cual consiste en una pared vegetal por donde se hacen circular las aguas grises generadas en distintas actividades.

4. METODOLOGIA

El trabajo de aplicación comprendió las siguientes fases:

Fase 1. Identificación de especies vegetales nativas que tengan la capacidad de remover rápidamente contaminantes provenientes de efluentes de la industria procesadora de guayaba.

Actividad 1. Selección de especies vegetales y medios granulares a través de la búsqueda de información sobre especies de plantas nativas de humedales en quebradas y ríos de San Gil, que sirvieran para el proceso de fitorremediación en los humedales artificiales.

Para la selección, se tuvieron en cuenta los rangos de temperatura y pH que permitiera el desarrollo de las plantas así como del residuo.

Actividad 2. Recolección de ejemplares pertenecientes a la especie escogida.

Al recolectar las plantas, se tuvo en cuenta su aspecto (apariencia general). Se eligieron plantas completas incluyendo la mayor cantidad de rizomas. La recolección se realizó manualmente sin maltratar la parte aérea y radicular (Tejeda, 2010).

Actividad 3. Estimación de la capacidad de adaptación de los ejemplares recolectados al medio granular.

Las especies vegetales se acondicionaron al sustrato granular elegido (arena con diámetro entre 0,5-0,1 mm) en bolsas. Se sembraron varias plantas jóvenes, agregando agua potable (dejando reposar el agua durante un día para eliminar el cloro presente) y manteniendo el nivel del líquido por debajo del nivel del material

de soporte de las plantas (simulando las mismas condiciones de un humedal horizontal de flujo subsuperficial). Se verificó la aparición de nuevos brotes y el estado de las plantas durante un período de 2 meses (Tejeda, 2010).

Fase 2. Comportamiento en el tiempo de los principales constituyentes de aguas residuales provenientes de la industria procesadora de guayaba.

Actividad 1. Construcción del prototipo.

Se simuló un humedal de flujo horizontal de tipo sub-superficial (Tejeda, 2010). Las dimensiones fueron de 1,0 m de largo; 0,6 m de alto y 0,6 m de ancho; los materiales utilizados para la construcción del prototipo fueron: tablas de madera, plástico impermeable (polietileno) y tubería PVC.

Actividad 2. Realización de experimentos para el seguimiento de las características fisicoquímicas y microbiológicas del agua residual en tratamiento.

Las plantas que se adaptaron al medio granular, se sembraron en cada unidad; se agregó para ello una capa inicial de 1 cm de arena gruesa, luego una capa de 10 cm de arena delgada y finalmente una capa de 10 cm arena gruesa. Se tuvo en cuenta el desnivel de los pilotos (que asegura la escorrentía de las aguas para su recuperación) agregando 2,5 cm menos de relleno en la parte superior de los prototipos. El volumen de agua necesario para inundar cada una de las unidades, fue la tercera parte del volumen total, cuando se llena de arena. Este volumen fue determinado experimentalmente utilizando un vaso de precipitados de 1,5 L, llenándolo de arena y posteriormente con agua hasta nivel de inundación.

Para evitar que las precipitaciones alteren los resultados de los análisis, se implementó una cubierta móvil para que las plantas reciban el sol, y a su vez las mantenga aisladas de las lluvias.

De una empresa de bocadillos ubicada en el municipio de Vélez, se tomó una muestra puntual del desagüe en donde convergen todas las aguas residuales procedentes de las etapas del proceso, tomando 50 L de agua residual. Esta muestra fue trasladada hasta San Gil el día 16 de Julio de 2014. Ese mismo día se inundó el piloto en 10 ocasiones con el agua residual (5 L en cada lavado); ésta reemplazó el agua que se había introducido durante los días anteriores. Se realizó el mismo procedimiento con la cama del blanco, pero con agua potable almacenada desde el día anterior.

Se recirculó el agua cada día (proceso en el que se introdujo el efluente tratado de nuevo a la entrada del sistema (EPA, 2010)), se dejó abierta la llave de la salida durante una hora en cada cama, y se verificó el volumen de líquido para mantenerlo constante, igualando a 6 L y adicionando un volumen equivalente al que se perdía por evapotranspiración. Esto se realizó durante los 3 meses de la prueba.

Se tomaron muestras cada 15 días, tanto del piloto como del blanco, durante tres meses. El blanco sirvió como referencia y se realizó en paralelo alimentando el sistema con agua potable (dejando reposar el agua durante un día para eliminar el cloro) (Montoya *et al.*, 2010).

Actividad 3. Caracterización de las muestras tomadas durante los experimentos realizados.

Las muestras se caracterizaron de acuerdo a los siguientes parámetros: pH, DBO, DQO, fósforo total, nitrógeno y turbidez (Fernández *et al.*, 2004). Estos parámetros son de gran interés porque brindan información el proceso de transformación que se lleva a cabo en el humedal (ver Tabla 2).

Todas las muestras, se tomaron de forma puntual (muestra recolectada en un lugar y tiempo específico y que refleja las circunstancias particulares del cuerpo de agua

para el momento y sitio de su recolección), manteniéndolas refrigeradas hasta su correspondiente análisis.

Tabla 2. Análisis físicoquímicos seleccionados para la caracterización de aguas en la presente propuesta.

PARÁMETRO	MÉTODO	NORMA
DBO	Respirométrico	SM 5210 D
DQO	Titrimétrico	SM 5220
pH	Potenciométrico	SM 4500
Sólidos disueltos	Gravimétrico	SM 2540 C
Nitrógeno total	Kjeldahl-Titrimétrico	SM 4500 - N
Fósforo total	Espectrofotométrico	SM 4500- P C
Turbidez	Turbidimétrico	SM 2130 B

FASE 3. Análisis de la viabilidad del tratamiento.

Se realizó el análisis técnico y económico para evaluar la viabilidad de este tipo de tecnología para su uso en el tratamiento de efluentes provenientes de la industria productora de bocadillo.

Para este análisis se tuvo en cuenta: los materiales de construcción del humedal, la localización/ubicación del humedal, consideraciones para el tamaño, y la estimación del tiempo de retención con el modelo general de diseño.

5. DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1 SELECCIÓN Y RECOLECCIÓN DE PLANTAS

La etapa de selección de las plantas se realizó el día 4 de Enero de 2014, en un trabajo de campo desde el Km 5 vía San Gil- Bucaramanga, hasta el puente Gómez Silva en el río Fonce, donde se identificaron las especies más representativas de este río y sus afluentes (Figura 3).



Figura 3. Fotografías de las plantas seleccionadas: A. *Pennisetum purpureum*. B. *Panicum máximum*. C. *Arundo donax*. D. *Gynerium sagytattum*.

Teniendo como base el registro fotográfico resultado de la salida de campo se logró identificar cada una de las especies predominantes en esta zona (ver Tabla 3). Estas plantas se encontraron en sitios en los que predominaban soportes de arena y rocas; por estar cerca de los ríos el sustrato era húmedo.

Tabla 3. Clasificación taxonómica de plantas recolectadas.

Nombre Científico	<i>Panicum maximum</i>	<i>Arundo donax</i>	<i>Pennisetum purpureum</i>	<i>Gynerium sagittatum</i>
Reino	<i>Plantae</i>	<i>Plantae</i>	<i>Plantae</i>	<i>Plantae</i>
Phylum	Magnoliophyta	Magnoliophyta	Magnoliophyta	Magnoliophyta
Clase	Liliopsida	Liliopsida	Liliopsida	Liliopsida
Orden	Cyperales	Cyperales	Cyperales	Cyperales
Familia	Poaceae	Poaceae	Poaceae	Poaceae
Género	Panicum	Arundo	Pennisetum	Gynerium
Epíteto Específico	Maximum	Donax	Purpureum	Sagittatum

Fuente: <http://www.biovirtual.unal.edu.co/ICN/>

La recolección (Figura 4) se realizó en varias fechas según lo planteado en la Tabla 4, con el fin de mantener el número de plantas.

Tabla 4. Fechas de la recolección de plantas.

Fecha	Ubicación geográfica	Total ejemplares recolectados
10 enero	Milagrosa	30
25 enero	Rio Fonce	20
9 febrero	Milagrosa	15
15 abril	Rio Fonce	12
1 mayo	Rio Fonce	12



Figura 4. Recolección de plantas a orillas de ríos.

5.2 ETAPA DE ADAPTACIÓN DE PLANTAS

La etapa de adaptación al medio granular (Figura 5) tuvo una duración de 2 meses sin incorporar ningún tipo de nutriente, solo agua sin cloro. La adaptación de las plantas fue difícil, ya que la composición de la arena era insuficiente para satisfacer las necesidades de las plantas (muriendo varios ejemplares) y teniendo que reemplazar varias de ellas (Arenillas, 1990).



Figura 5. Etapa de adaptación al medio granular.

Las plantas que mejor se adaptaron al medio y sobrevivieron fueron las especies *Gynerium sagittatum* y *Arundo donax*. Se seleccionó la *Gynerium sagittatum* por tratarse de una planta originaria de América, mientras que el *Arundo donax* es originaria de Asia (Deltoro *et al.*, 2012). Después de recolectar y seleccionar las plantas (según su capacidad de adaptación al medio granular), se procedió a plantarlas en la unidad piloto.

5.3 ETAPA DE FABRICACIÓN DEL PROTOTIPO

El principal inconveniente presentado durante la construcción del prototipo (Figura 6) fue el de asegurar la ausencia de fugas de líquido en el sistema (por filtración a través del material y accesorios).



Figura 6. Prototipos utilizados durante la experimentación (blanco y piloto)

Finalmente, los materiales utilizados fueron: cama en madera de (1 m ancho x 0,6 m largo x 0,6 m profundidad), lona (compuesta de poliéster y poliuretano) y arena de río tamizada con un diámetro de partícula entre 0,05-4 mm; en donde se sembraron las plantas de la etapa anterior.

5.4 EXPERIMENTOS REALIZADOS PARA EL SEGUIMIENTO DE LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICOQUÍMICAS Y MICROBIOLÓGICAS DEL AGUA RESIDUAL EN EL TRATAMIENTO.

Al tomar el agua residual en la planta procesadora de guayaba de forma puntual, no se tiene la certeza si la concentración en el transcurso del día se mantiene en el proceso, no obstante al realizar la caracterización el valor de la DQO se conserva en 5600mg/L tanto para los análisis realizados el 25 de Junio y el 17 de Julio antes de adicionar el agua residual en la unidad piloto. Se recomienda en futuras investigaciones realizar un muestreo compuesto.

5.5 COMPORTAMIENTO EN EL TIEMPO DE LOS PRINCIPALES FACTORES QUE AFECTAN EL TRATAMIENTO.

Debido a la importancia en el proceso biológico se realizó el seguimiento al pH durante la experimentación. La Figura 7 muestra su variación en el tiempo durante el desarrollo de las pruebas.

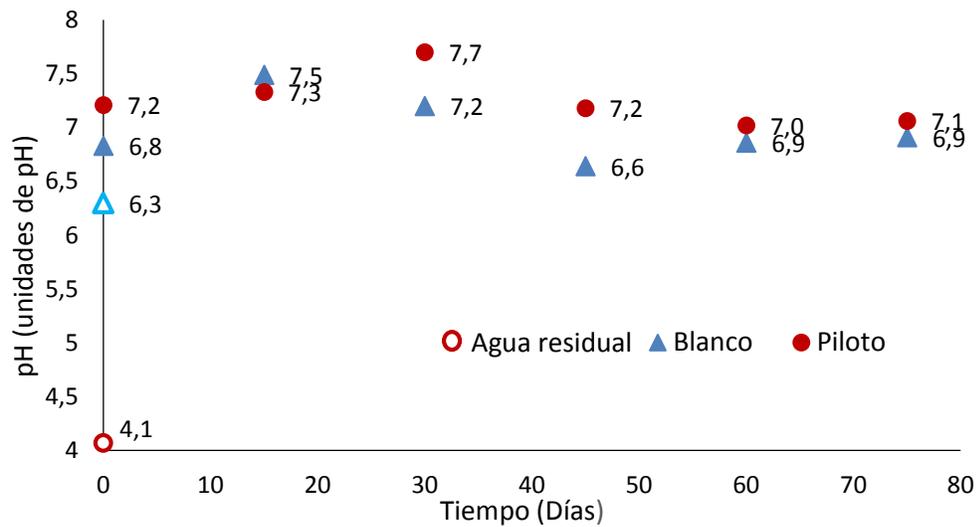


Figura 7. Variación del pH durante la experimentación en el Blanco y Piloto.

De esta figura se observa que no existe variación considerable del pH tanto en el piloto como en el blanco durante el tiempo de duración de la prueba. En la unidad piloto, la variación del pH estuvo entre 7,0-7,7 con un promedio de 7,25. En el blanco la variación del pH fue de un 6,6-7,3 con un promedio de 6,96. El pH óptimo para el desarrollo de la planta (*Gynerium Sagitatum*) oscila entre 6-8,5 (*plants.usda.gov*). Por lo tanto, se tuvo un pH favorable y estable para el mantenimiento de las plantas en la unidad piloto y en el blanco (Machado & Roldán, 1981). En los procesos de tratamiento biológico, la mayor parte de las bacterias se desarrollan en intervalos de pH entre 4 y 9, siendo el óptimo entre 6,5 y 7,5; es decir, que el pH fue el óptimo para el desarrollo de los microorganismos que intervienen en la depuración (Félez, 2009).

La Figura 8 muestra el volumen de agua adicionado para mantener constante el nivel del líquido en cada uno de los sistemas (blanco y piloto) durante la experimentación.

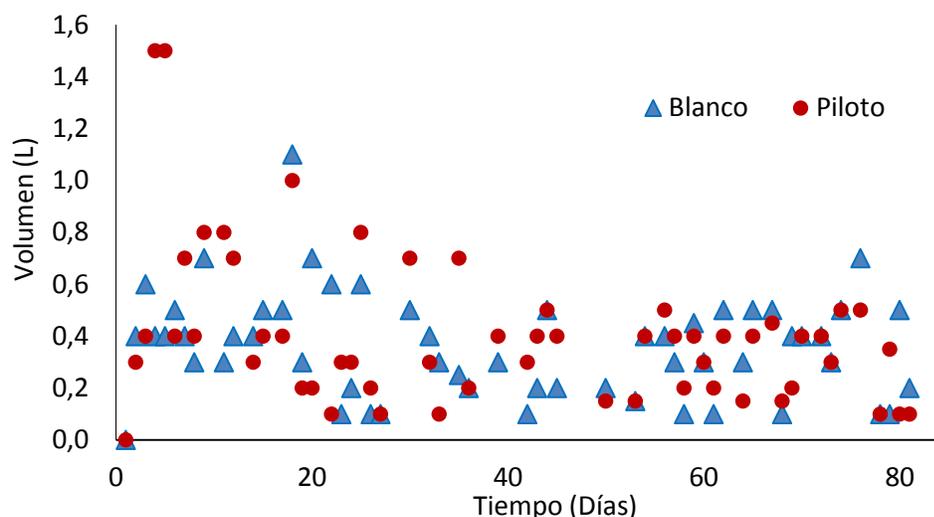


Figura 8. Volumen de agua (sin cloro) adicionada en el Blanco y Piloto durante la prueba.

El volumen de agua adicionado por día osciló entre 0-1,1 L en el blanco con un promedio de 0,35 L/día. Para el piloto la variación fue de 0-1,5 L y su promedio de 0,37 L/día. Comparando los promedios, la variación entre el blanco y el piloto no fue considerable y no muestran una tendencia en el tiempo.

El agua total adicionada fue de 20,5 L para el blanco y de 23 L para el piloto. La diferencia es del 11% superior para el piloto. Esta variación puede ser atribuida a la diferencia entre los estados de desarrollo de las plantas en ambos sistemas, que para el caso del piloto estuvo en presencia del agua residual y el blanco no. Es importante señalar que para el caso del piloto se presentó marchitamiento y muerte de 3 plantas debido a la puesta en contacto con el agua residual (pH 4).

Debido a la importancia de la temperatura en la transpiración de la planta, se analizó la variación de este parámetro (a partir de datos tomados de la página <http://www.accuweather.com/>). Al observar las variaciones de temperatura presentadas en la Figura 7, el 30% de los datos estuvo por encima de 35°C. En algunos casos a pesar de que la temperatura ambiente fue mayor, el agua

adicionada fue menor con respecto a los días menos cálidos (30°C-35°C) (ver Figura 9). Esto se debe al posible cierre de los estomas, el cual se presenta por la acumulación de CO₂ y la deshidratación de las hojas (Raven *et al.*, 1992).

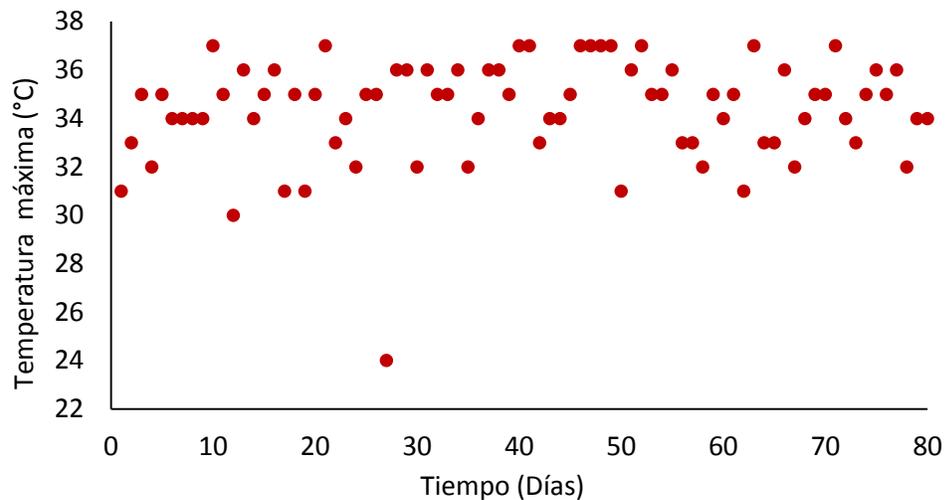


Figura 9. Temperatura máxima durante el periodo de experimentación.

La DBO es un indicador de la materia orgánica presente en un efluente (Soon & Seok, 2002). El agua residual obtenida de la planta procesadora de guayaba (antes de ser vertida en el piloto) presentó un valor de 1400 mg/L para la DBO, valor que se considera alto, indicando la contaminación del agua y cargas significativas de materia orgánica (Bellos & Sawidis, 2005). Al incorporar el agua residual en el piloto (lavando 10 volúmenes la unidad piloto con el agua residual antes de la incorporación), se observó una disminución significativa de la DBO (940 mg/L). Esto se debe a la retención de materia orgánica insoluble por parte del medio poroso (arena).

La variación en los parámetros de la DBO y DQO, se muestra en las Figuras 10 y 11, respectivamente. Se tomaron como valores iniciales para la DBO y DQO, 1400 mg/L y 5600 mg/L, respectivamente. De estas figuras se observa que estos parámetros disminuyen con el tiempo; en especial en los primeros 15 días. La

disminución durante este tiempo fue de un 75% y 89,2% para la DBO y la DQO respectivamente.

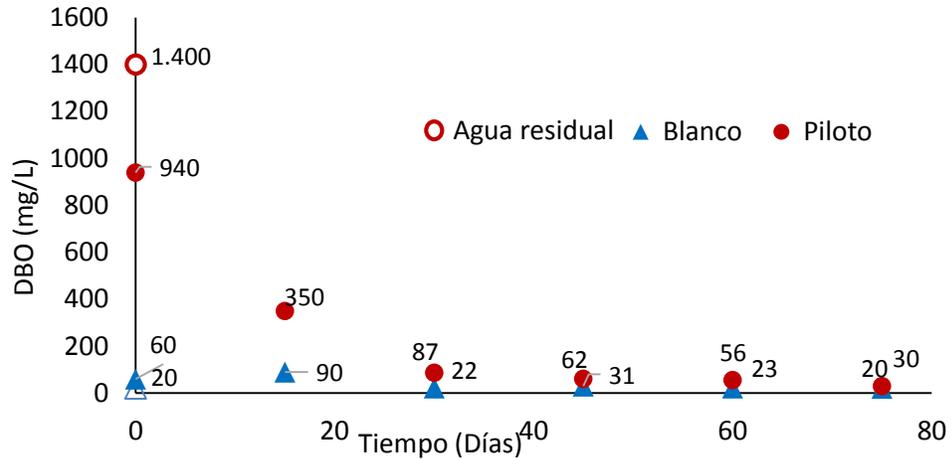


Figura 10. Seguimiento de la DBO en el Blanco y Piloto.

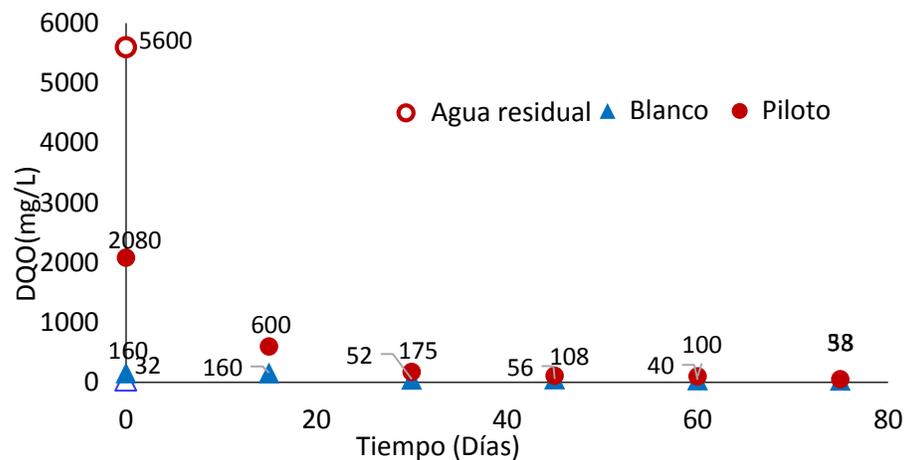


Figura 11. Seguimiento de la DQO en el Blanco y Piloto.

La relación entre DBO/DQO indica la viabilidad del tratamiento biológico. Así, cuando es mayor a 0,6 es un vertido esencialmente orgánico fácilmente degradable, y si esta relación es inferior a 0,2 indica un vertido esencialmente inorgánico u orgánico recalcitrante, imposible de tratar de manera biológica (Nerín, 1999), es decir, no se transforma en absoluto (Castillo *et al.*, 2005). La relación establecida para la muestra original tomada de la planta de bocadillo fue de 0,25 ($\frac{DBO}{DQO} = \frac{1400}{5600} = 0,25$). Este valor se encuentra dentro del rango, siendo posible la degradación

biológica. Este valor se presentó debido a la utilización permanente por parte de la industria alimenticia de detergentes y desinfectantes en las etapas de limpieza y desinfección de cada una de las etapas del proceso. Esto dificultaría su tratamiento y es un aspecto a considerar en posteriores estudios que se hagan sobre el tema.

La Figura 12 muestra la variación de nitrógeno total en el tiempo. De esta figura se observa que se mantienen en el tiempo. El dato inicial en el blanco, no es cero, porque el nitrógeno se encuentra en el suelo y el agua en forma de nitratos o nitritos, resultado de la descomposición natural de proteínas de plantas o animales por medio de microorganismos (Murrel, 2003) (Vitoria *et al.*, 2009). Esto es gracias al proceso de nitrificación en donde se obtiene nitrato que es asimilado muy fácilmente por las plantas (Castillo *et al.*, 2005). Después de los 15 días de tratamiento, los valores variaron entre un 8,9-14,3 mg/L en el piloto con un promedio de 14,8 mg/L. Para el blanco los valores siempre estuvieron entre 8,9-13 mg/L con un promedio de 11,4 mg/L.

En condiciones de suelo húmedo el NO_3^- , puede convertirse en formas gaseosas de N_2 a través del proceso de desnitrificación, como N_2O y el NH_4^+ puede convertirse en NH_3 regresando a la atmósfera mediante volatilización (Murrel, 2003).

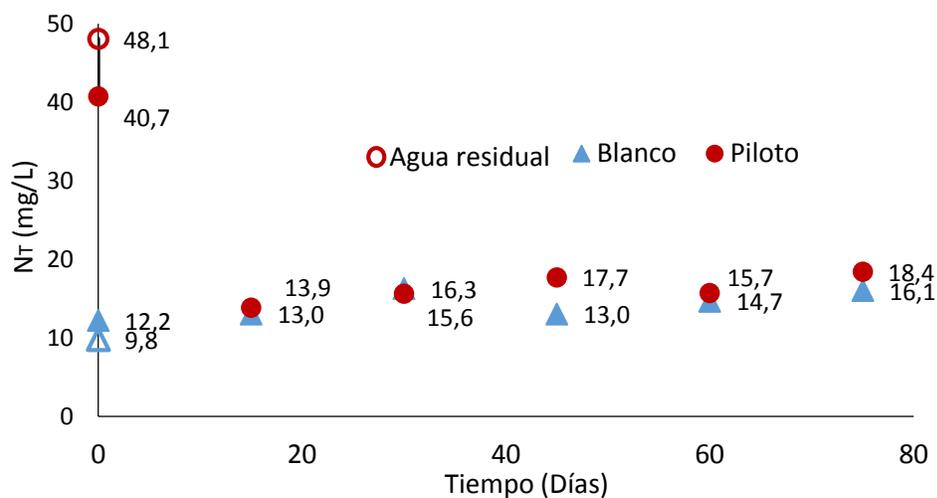


Figura 12. Seguimiento del contenido de Nitrógeno total en el Blanco y Piloto.

En la Figura 13, se muestra la concentración de fósforo total en el tiempo con valores comprendidos entre 1,9 mg/L y 11,8mg/L. En ella se observan valores que no permiten concluir sobre el comportamiento en el tiempo de este parámetro. La presencia de fósforo en aguas residuales es debida a detergentes y fertilizantes, este parámetro tiene un papel fundamental en el deterioro de las masas acuáticas (Félez, 2009), en futuros trabajos se recomienda evaluar este parámetro (y otros de interés) considerando tiempos menores de muestreo

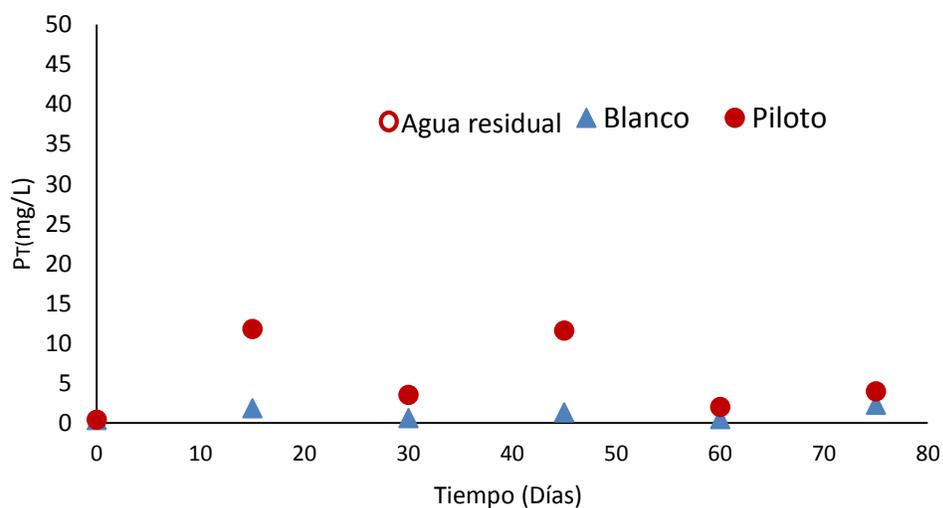


Figura 13. Seguimiento del contenido de Fósforo (P) en el Blanco y Piloto.

La Figura 14, contiene los datos de turbidez obtenidos en la fase experimental. La muestra tomada del agua de referencia antes de ser adicionada en el blanco tiene 2 NTU; después de ser lavado el blanco se incrementa a 33 NTU. Este cambio se debe a la interacción del agua con el sustrato y las plantas (debido a la presencia de partículas de muy pequeño tamaño encontradas tanto en el sustrato como en el sistema radicular de las plantas). En el blanco no hay variación considerable de la turbidez en el tiempo, manteniéndose dentro de un rango entre 33 y 61 NTU después de lavar el sistema. Mientras que para el piloto el descenso es sustancial al ser adicionada en el sistema, esto es debido a la retención de sólidos en el sustrato (arena).

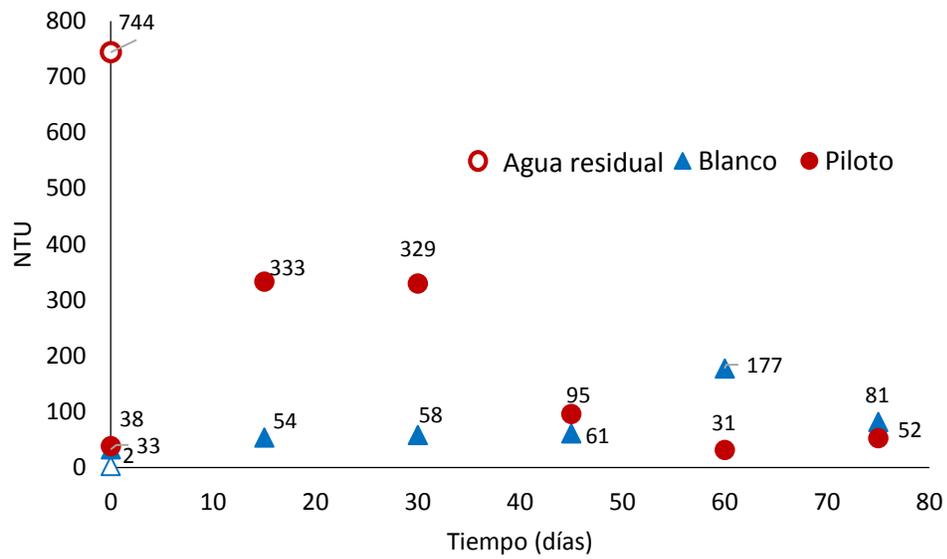


Figura 14. Seguimiento del contenido de Turbidez en el Blanco y Piloto.

En la Tabla 5, se muestra la relación establecida entre la DBO, DQO y fósforo durante el tiempo del análisis, teniendo en cuenta la caracterización de las muestras tomadas. Según Conama (1998), la relación óptima para tratamientos biológicos aerobios es de 90:15:1 y para anaerobios 350:5:1. Se observó una prevalencia de un proceso anaerobio en los primeros 15 días del tratamiento, que es en donde se presenta la mayor disminución de cada uno de los contaminantes analizados; por tanto es el que se ve favorecido. Las relaciones óptimas no se cumplieron durante la experimentación.

Tabla 5. Relación entre DBO:N:P con los datos obtenidos en la experimentación.

Análisis Días	PROPORCIÓN DBO:N:P			TENDENCIA
	DBO	N	P	
INICIAL	88,0	4,7	1	AEROBIA
0	376,3	12,9	1	ANAEROBIA
15	2292,7	33,8	1	ANAEROBIA
30	29,7	1,3	1	AEROBIA
45	16,1	5,0	1	AEROBIA
60	5,3	1,4	1	AEROBIA
75	14,9	9,2	1	AEROBIA

Fuente: Conama, 1998

En la Figura 15, se observan los cambios más destacados en la fase de experimentación. Así, al lavar el piloto (tiempo cero) se observó que el agua obtenida era casi incolora (Figura 15A.), al día siguiente se observa una coloración café (Figura 15B) y después de 15 días se tornó rojiza y en la superficie una pequeña fase oleosa (Figura 15C).

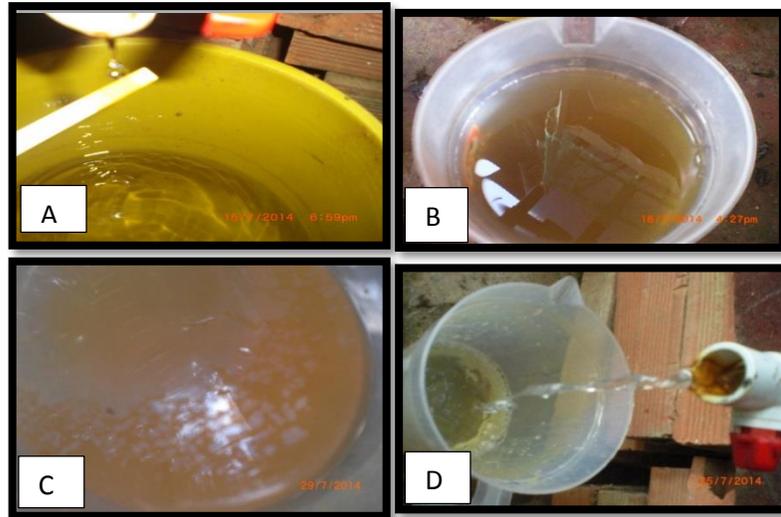


Figura 15. Apariencia del agua recogida durante la etapa de experimentación en el piloto. (A) Agua al lavar el piloto. (B) Agua al día siguiente del lavado. (C) Agua después de 15 días formación fase oleosa. (D) Óxido de hierro formado en la tubería.

Es importante destacar que en los tubos de la salida se formó una capa semejante al óxido de hierro; por lo tanto es posible la presencia de bacterias ferrosas (Figura 15D). Esta hipótesis surge al evidenciar la aparición de una coloración café rojizo y un olor característico del agua recolectada al cabo de este tiempo. Posteriormente, la coloración disminuyó y al concluir el periodo de experimentación, el agua fue casi incolora. Se realizó un análisis complementario al finalizar la experimentación, para confrontar el contenido de hierro en las últimas muestras tomadas del blanco y el piloto, en donde se encontró un valor de 0,05 mg/L y 0,68 mg/L, respectivamente.

La Agencia para la Protección Ambiental de los EE.UU. ha establecido que los Niveles Máximos de contaminantes Secundarios (SMCL) para hierro son 0,3 mg/L (McFarland & Dozier, 2001). Esto apoya la hipótesis de una posible contaminación

por parte de bacterias de hierro en el piloto. Al tener presente que las condiciones para el blanco y piloto fueron las mismas y el sustrato era el mismo, se puede establecer que dichas bacterias estaban presentes en la muestra tomada en la planta procesadora de guayaba.

La Figura 16, muestra el contenido de sólidos en el piloto y el blanco. En un principio un incremento del porcentaje (de 0,8%-1,2%) al lavar el piloto debido a posibles sales presentes en la arena, después de 15 días los valores son mínimos demostrando eficiencia en la remoción de los sólidos disueltos.

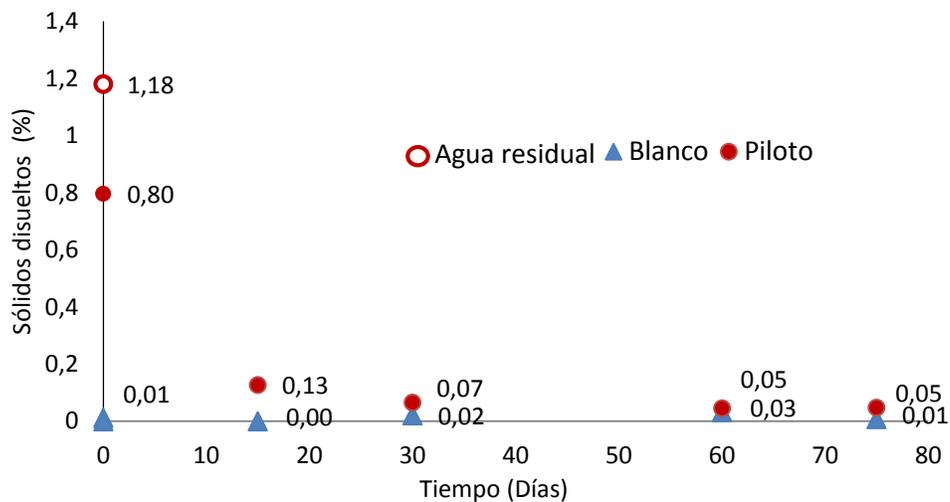


Figura 16. Seguimiento Sólidos disueltos en el Blanco y Piloto.

5.6 CUMPLIMIENTO DE LA NORMATIVIDAD DE VERTIMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Según la Resolución 0631 del 17 de marzo de 2015 "Por la cual se establecen parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales, a cuerpos de agua superficiales y a los sistemas de alcantarillado público" en la que se reglamenta el artículo 28 del Decreto 3930 de 2010 y actualiza el Decreto 1594 de 1984. El artículo 12 está relacionado con la elaboración de productos alimenticios y bebidas, en donde el máximo permisible para la DQO es de 600 mg/L y para la

DBO una concentración de 400 mg/L; los cuales se alcanzan al cabo de 15 días de tratamiento.

5.7 CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑO DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

La localización/ubicación del humedal.

El presente estudio busca generar resultados que suministren información valiosa que permita una posible implementación en la industria procesadora de bocadillos, más específicamente en el municipio de Vélez. Este municipio, ubicado en la bioregión sub-andina de Santander, cuenta con un ecosistema estratégico indispensable para el desarrollo económico que se ha venido afectando por la actividad humana, en especial la contaminación de las fuentes hídricas que abastecen de agua al municipio en el sector urbano y rural.

La deforestación, falta de franja forestal, vertimiento de aguas residuales y la presencia de residuos sólidos son unos de los problemas a grandes rasgos que han llevado a que las diferentes subcuencas del municipio se estén deteriorando cada vez más, disminuyendo el caudal y la biodiversidad del municipio (Plan de desarrollo municipio de Vélez 2012-2015).

La Figura 17, muestra las variaciones de temperatura máximas de los municipios de San Gil y Vélez durante la experimentación. Al comparar las temperaturas de los municipios de Vélez (lugar donde se plantea realizar el humedal artificial) y San Gil (lugar en donde se llevaron a cabo las pruebas piloto). A pesar de los 15°C de diferencia entre los dos municipios, se puede decir que no afecta de manera significativa el proceso de fitorremediación, ya que las temperaturas máximas nos indican las horas diurnas, que es en donde se lleva a cabo el proceso de fotosíntesis. Para las plantas seleccionadas (*Gynerium Sagitatum*) se encuentra a una temperatura promedio anual de 22-27°C.

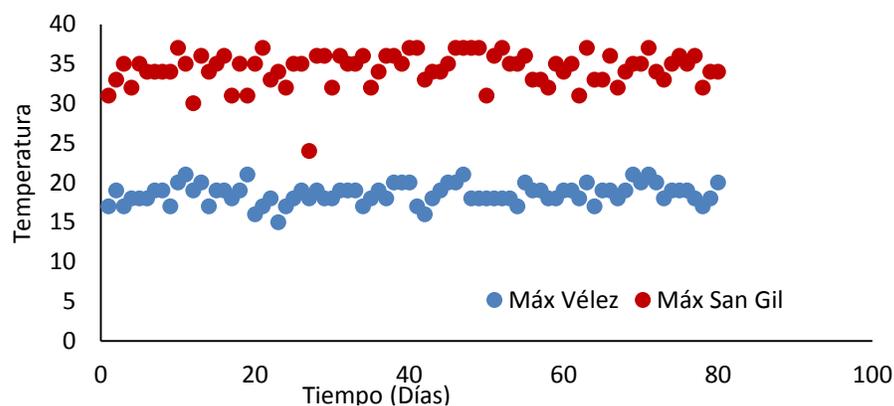


Figura 17. Comparación entre las temperaturas máximas de los municipios de San Gil y Vélez.
Consideraciones para el tamaño

La Figura 18, representa el logaritmo natural de la concentración de DBO y DQO vs el tiempo. En ella se observa una tendencia lineal de esta variable con respecto al tiempo, lo cual indica una reacción de primer orden ($v = -\frac{d[A]}{dt} = k[A]$). En la determinación de la constante de reacción se incluyeron todos los datos experimentales, donde K_r es la constante de reacción, representada por la pendiente de dicha curva. Los resultados muestran un K_r de 0,0439 para DBO y de 0,0506 para la DQO.

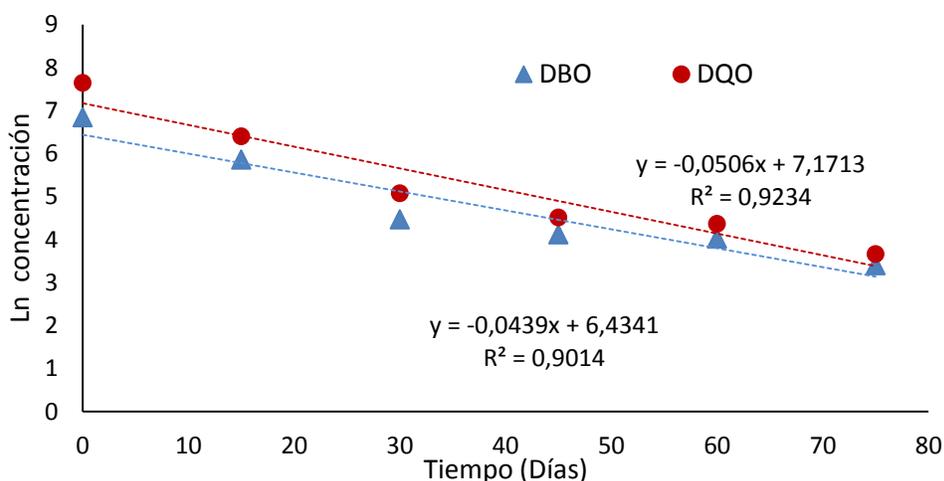


Figura 18. Representación de Ln de la concentración de DBO y DQO vs tiempo

A partir de este dato y de la ecuación 1, se determinó el área superficial del humedal (As)

$$\text{Ecuación 1.} \quad A_s = \frac{Q \cdot (\ln C_o - \ln C)}{k_r \cdot d \cdot \eta}$$

Donde,

Q= Caudal a tratar, (m³/d)

C_o= concentración de DQO a la entrada, (mg/L)

C= concentración de DQO a la salida(mg/L)

K_r= Coeficiente de tasa de primer orden, (días⁻¹)

d= profundidad del medio, m;

η= Porosidad efectiva del sustrato.

Para determinar el caudal, se consideró un consumo de agua de 0,4 m³ agua/ton guayaba procesada (DAMA, 2004) y un gasto de 35,7 ton guayaba/día (Rueda, 2006). Así el caudal estimado es de 14,28 m³/día. Para la porosidad efectiva de un sustrato de arena con grava (η) se utilizaron los valores de 0,35 y 0,38; según lo reportado por Crites & Tchobanoglous (1998).

La Tabla 6, agrupa los datos de las variables necesarias para realizar los cálculos del área superficial necesaria para llevar a cabo el tratamiento de aguas residuales generadas por una empresa procesadora de guayaba.

Tabla 6. Valores de variables utilizadas en la determinación del área superficial.

Parámetro	DBO	DQO
Q	14,28m ³ /d	14,28m ³ /d
C _o	940mg/L	2080 mg/L
C	350mg/L	600 mg/L
K _r	0,0439d ⁻¹	0,0506 d-1
D	0,6m	0,6m
η	0,35-0,38	0,35-0,38

Al determinar las dimensiones se tuvo en cuenta una relación largo: ancho de 2:1, que es próxima a la utilizada en las pruebas piloto y según los estudios realizados por la *Environmental Protection Agency* (EPA) (2000). La relación largo: ancho no interfiere con la capacidad de remoción, siempre y cuando el sistema esté

correctamente contruidos y las estructuras de entrada y salida permitan el flujo uniforme a través del sistema.

Para disminuir la DBO y DQO, se consideró una porosidad efectiva del sustrato promedio de 0,365. Para la DQO se requeriría un área aproximada de 1 448 m² y de 1 470 m² para la DBO. Por ser mayor esta última, el área a considerar es de 1470 m² con unas dimensiones de 54,22 m largo x 27,11 m de ancho x 0,6 m de profundidad, asegurando un volumen de 882 m³. El área total necesaria para llevar a cabo el proyecto se ajustaría a lo dispuesto para la nueva planta procesadora a construir en zona industrial de Vélez, Santander.

En la Figura 18, se puede apreciar el diseño del humedal según las dimensiones de cada sección en particular. El diseño es sencillo, de forma que se pueda realizar fácilmente. En la Figura 19, se puede observar la disposición de la distribución de la carga contaminante en el humedal. Para proporcionar la uniformidad del flujo a través del canal, la entrada al sistema se realiza utilizando un tubo perforado en forma de "T" de 2 in de diámetro, ya que esta permite el ajuste rápido de la distribución del flujo. Las perforaciones en el tubo deben estar espaciadas uniformemente a una distancia aproximadamente del 10% de la anchura de la celda (para el presente estudio 2,5 m, aproximadamente), con mismo tamaño y forma, suficientemente grande para prevenir su taponamiento) (1 in de diámetro) (Montiel, 2014).

Materiales de construcción del humedal

Los materiales necesarios para la construcción del humedal se muestran en la Tabla 7, así como el precio de cada uno de ellos y el costo total teniendo en cuenta el área superficial del humedal de 1 470 m².

Tabla 7. Materiales de construcción del humedal.

Concepto	Unidad de medida	Precio por unidad	Unidades	Total
Geomembrana cal 20	m ²	6 458	1 550	10 000 990
Tubos (de PVC 3/4 pulg)	m	2 266	13 800	193 200
codos (de PVC)	Unidad	2000	3	6 000
Arena	m ³	25 000	441	11 025 000
Grava	m ³	35 000	441	15 435 000
Maestro de Obra	N.A.	1 500 000	1	1 500 000
Obreros (*2)	Día	25 000	15	1 500 000
Plantas	4 unidades x m ²	1 000	5 880	5 880 000
Máquina retroescavadora	Horas	100 000	8	800 000
Máquina aplanadora	Horas	200 000	2	400 000
Total				46 740 190

El tratamiento de las aguas generadas en la empresa productora de bocadillo tiene una inversión aproximada de 46 800 000, siendo un proyecto viable con mejoras en cuanto al uso y liberación del agua utilizada, generando un menor impacto ambiental.

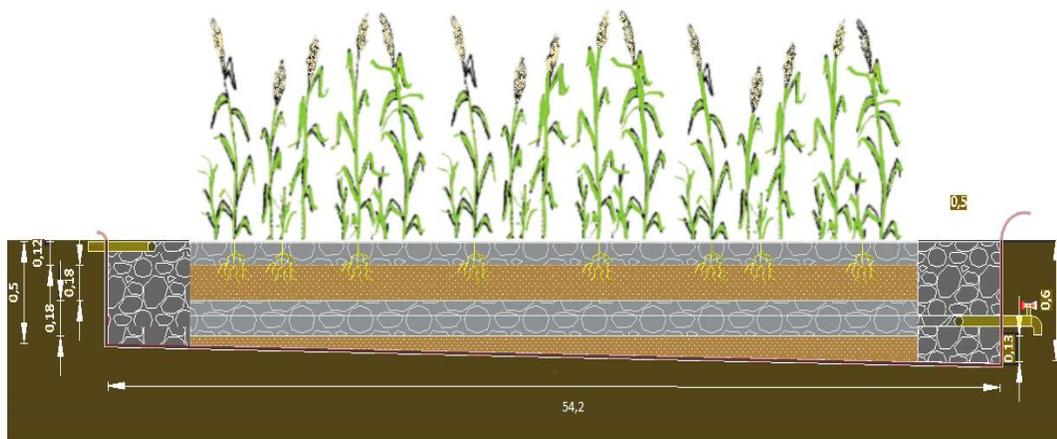


Figura 19. Propuesta para diseño del humedal en la planta procesadora de bocadillo.

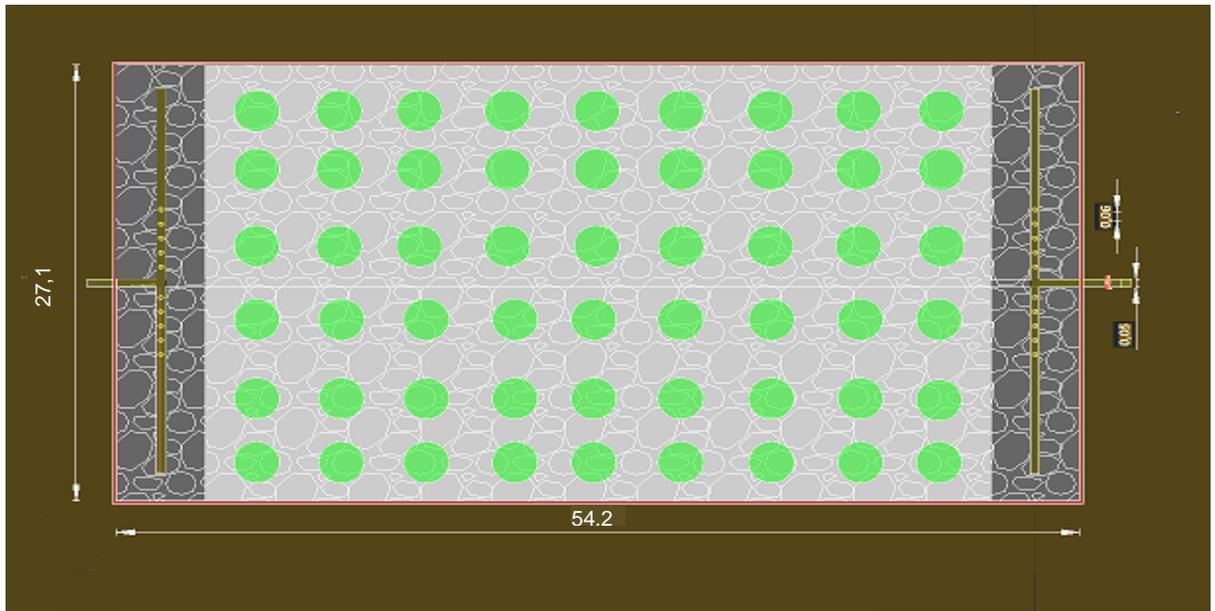


Figura 20. Corte transversal de la vista superior del diseño del humedal.

6. CONCLUSIONES

- Se identificaron 4 especies nativas, alrededor de las fuentes hídricas en San Gil *Pennisetum Purpureum*, *B. Panicum máximum*, *C. Arundo Donax* y *D. Gynerium sagytattum*, pero durante el periodo de adaptación la que mejor se comportó al medio granular fue la *Gynerium sagitatum*, que fue con la que se realizó el estudio.
- La caracterización de las muestras obtenidas de la planta procesadora de productos a base de guayaba fue de 1400 mg/L para DBO, 5600 mg/L en DQO y un pH de 4,1. Utilizando un piloto en configuración de flujo subsuperficial al cabo de 15 días, los valores de DBO y DQO fueron 350 mg/L y 600 mg/L, cumpliendo con los niveles máximos de concentración permitidos según la Resolución 0631 del 17 de marzo de 2015. Para el mismo tiempo, los sólidos disueltos mostraron una reducción del 88,9% y el pH se mantuvo entre 7,0-7,7. El contenido de Nitrógeno total se mantuvo estable durante la experimentación con un promedio de $16,3 \pm 2,3$ mg/L. En cuanto al Fósforo total su valor estuvo entre 3,7 y 11,79 mg/L.
- El análisis del comportamiento y los cálculos realizados permitieron estimar la superficie de humedal subsuperficial requerida para el tratamiento de las aguas residuales producidas por una empresa procesadora de guayaba de mediana capacidad. Para procesar $14,28 \text{ m}^3/\text{día}$ se necesitaría un área de $1\,470 \text{ m}^2$ ($54,22 \text{ m} \times 27,11 \text{ m}$) con una profundidad de 0,6 m, para asegurar un tiempo de retención razonable de 15 días, requiriendo una inversión en materiales y obra de aprox. 46 800 000 de pesos colombianos. Esto muestra una inversión moderada para la construcción, permitiendo con esto ajustarse a los requerimientos exigidos por la Ley, disminuyendo el impacto ambiental generado por este tipo de industria.

- El método de tratamiento de aguas residuales utilizando *Gynerium Sagitatum* en la configuración de flujo subsuperficial fue aplicable para el tratamiento de aguas residuales generadas del proceso de elaboración de bocadillo, en los cuales no se presentó ni proliferación de plagas ni olores, ofreciendo una mejora a nivel paisajístico y de fácil de mantenimiento.

7. RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar ensayos en humedales de flujo subsuperficial utilizando la configuración en continuo en lugar de batch (utilizada en el presente trabajo). Esto implica un piloto de mayor área. Estas pruebas permitirían igualmente evaluar el comportamiento del humedal en un periodo de tiempo más largo (1-2 años) y así verificar la estabilidad y eficiencia del tratamiento con respecto al tiempo.

Se deben realizar estudios tendientes a la aplicación de este tipo de tratamiento a otras industrias de alimentos como la avícola, bebidas, láctea, encurtidos, etc.

Para mejorar la caracterización y seguimiento, se recomienda incluir en estudios posteriores los análisis de conductividad y microbiológico.

BIBLIOGRAFIA

- [www.accuweather](http://www.accuweather.com/es/co/san-gil/106559/weather-forecast/106559). Consultado el 16 de noviembre de 2014. Disponible en: <http://www.accuweather.com/es/co/san-gil/106559/weather-forecast/106559>
- AKRATOS, Christosy. y TSIHRINTZIS Vassilios. Effect of temperature, HRT, vegetation and porous media on removal efficiency of pilot-scale horizontal subsurface flow constructed wetlands. Elsevier Febrero-Junio de 2006.
- ARENILLAS, Arturo. Propiedades químicas de las arenas (Baker Instituto de Bingley 1990) Greenkeepers
- Arm, 2011. Consultada el 10 marzo de 2015. Disponible en: <http://www.armreedbeds.co.uk/resources/constructed-wetlands/horizontal-flow/>
- Arm, 2011. Consultada el 10 marzo de 2015. Disponible en: <http://www.armreedbeds.co.uk/resources/constructed-wetlands/horizontal-subsurface-flow/>
- ARIAS Sandra. “Función de las Plantas, Flujo y Tipo de Vegetación en Humedales Técnicos construidos como alternativa para el tratamiento de las aguas residuales en países tropicales en desarrollo”, UIS, Tesis para optar por el título de Especialista en Ingeniería Ambiental, Escuela de Ingeniería Química, 2010.
- ARIAS, Sergio; BETANCUR, Ferney; GÓMEZ, Gonzalo; SALAZAR, Juan; HERNÁNDEZ, Marta. Fitorremediación con humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales porcinas. Informador Técnico (Colombia) Vol. 74, Diciembre 2010.

- BEASCOECHEA, E y; MUÑOZ J. Manual de fitorremediación. Universidad Politécnica de Madrid, Editan, 2004.
- BELLOS, D. y SAWIDIST, T. Chemical pollution monitoring of the River Pinios (Tesalia-Greece). Journal of Environmental Management: 76, 282-292 (2005)
- CALHEIROS, Cristina; RANGEL, Antonio; CASTRO, Paula. Constructed wetland systems vegetated with different plants applied to the treatment of tannery wastewater. 2007, Pág. 1790 – 1792
- CÁRDENAS, Ana; “Evaluación del desempeño de humedales construidos con plantas nativas tropicales para el tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios”, tesis máster en tecnología química y ambiental sevilla, 2012.
- CARRIÓN, G. Manual técnico de difusión sistema de tratamiento de aguas residuales para albergues en zonas rurales”, Plan Nacional de Calidad Turística del Perú – CALTUR, Ministerio de Comercio Exterior y Turismo, Lima-Perú, 2008.
- CASTILLO, Francisco. Biotecnología ambiental. Editorial Tebar Madrid 2005 ISBN-10: 8473602110
- CELIS José; JUNOD, Julio; SANDOVAL, Marco.; “Recientes Aplicaciones de la Depuración de Aguas Residuales con Plantas. ” Theoria, Vol. 14, Datateca ISSN 0717-196X. 2005. 25p,
- CODUTO, Donald. Geotechnical engineering, principles and practices Upper Saddle River, NJ, Prentice Hall Publishing. 1999.
- COOPER, P. The use of reed bed systems to treat domestic sewage: the European design and operations". G. A. Moshiri (Editor). Constructed wetlands for

water quality improvement. Lewis Publishers, Boca Raton, Florida, USA. 1993.203-205p.

- CRONK J; Fennessy S; "The role of plants in the removal of nutrients at a constructed wetland treating agricultural (dairy) wastewater, ecological engineering", 2007.155 p.
- DAMA (Departamento Técnico Administrativo del Medio Ambiente). Guía de buenas prácticas para sector alimentos. Unidad de Asistencia Técnica Ambiental para la pequeña y mediana empresa – Acercar Industria 2004.
- DELGADILLO, Oscar. CAMACHO, Alan. PEREZ, Luis. ANDRADE, Mauricio. Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales. Centro Andino para la Gestión y Uso del Agua (Centro AGUA). Universidad Mayor de San Simón. Cochabamba, Bolivia. 2010. ISBN: 978-99954-766-2-5.
- DELTORO, Vicente, JIMÉNEZ, Jesús. VILÁN, Xosé BASES PARA EL MANEJO Y CONTROL DE Arundo donax L. (Caña común) .Colección de Manuales técnicos biodiversidad. Unión Europea fondo europeo agrícola de desarrollo rural. 2012. 7p
- DITOMASO, Joseph. Biology and ecology of giant reed. In: Bell, Carl E. ed. In: Arundo and saltcedar: the deadly duo: Proceedings of a workshop on combating the threat from arundo and saltcedar. Ontario, CA. Holtville, CA: University of California, Cooperative Extension: 1-5. 1998.
- FÉLEZ, Marta. Situación actual del estado de la depuración biológica. Explicación de los métodos y sus fundamentos. 2009

- EPA (Environmental Protection Agency). Manual Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters United States Office of Research and Development, 2000.
- FERRER, José. SECO Aurora. Tratamientos biológicos de aguas residuales universidad politécnica de Valencia ,2003. 21-23p.
- GLYNN, Henry. y HEINKE, G. Ingeniería ambiental. Prentice Hall. México. segunda edición, 1999. 318p.
- KADLEC, Robert. WALLACE, Scott. Treatment Wetlands.CRC PRESS, by Taylor & Francis Group, LLC, Second Edition, 2009.
- KOTTI, Irini. GIKAS, Georgios. TSIHRINTZIS, Vassilius. Effect of operational and design parameters on removal efficiency of pilot-scale FWS constructed wetlands and comparison with HSF systems, Ecological Engineering. Journal. 2010.
- LI, J. Wen, Y. ZHOU, Q. XINGJIE, Z. Li, X. Yang, S. Lin, T. Relevance to Phytoremediation. 2005. 451p
- LLAGAS W; Guadalupe E; “Diseño de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales en la UNMSM”, Revista del Instituto de Investigaciones, Vol. 15, N° 17, 2006.
- MACHADO, T. y ROLDÁN, G. Estudio de las características fisicoquímicas y biológicas del río Anorí y sus principales afluentes. Actual. Biol. 1981.
- MEGH, R. Evapotranspiration Principles and Applications for Water Management. Edited by Eric W. Harmsen Apple Academic Press 2013.

- MONTOYA, J. CEBALLOS, L. CASAS J. MORATÓ J. Estudio comparativo de la remoción de materia orgánica en humedales construidos de flujo horizontal subsuperficial usando tres especies de macrófitas. Revista EIA, ISSN 1794-1237 Número 14. 2010.
- MURREL. Informaciones agronómicas No 49. Instituto de la potasa y el fósforo (INPOFOS) Canadá, 2003.
- NELSON, M. ALLING, A. DEMPSTER, F. THILLO V. ALLEN, J. Advantages of using subsurface flow constructed wetlands for water treatment in space applications: ground-based mars base prototype”, Vol. 31, No. 7, COSPAR, Published by Elsevier Science Ltd, 2003.
- NERÍN, Cristina. Urbanismo e ingeniería ambiental. Centro Politécnico Superior de Ingenieros. Universidad de Zaragoza.1999.
- OTÁLORA, Alejandra. Evaluación Del Sistema De Tratamiento De Aguas Residuales Domésticas Mediante Humedales Artificiales De Alta Tasa En La Locación Petrolera De Caño Gandúl. Trabajo final presentado como requisito para optar el título de: Magister En Ingeniería Ambiental Universidad Nacional de Colombia 2011.
- PEÑA, Carlos y LARA, Jaime. Tratamiento de aguas de escorrentía mediante humedales artificiales: estado del arte. Ciencia e ingeniería neogranadina, 2012. ISSN: 0124-8170
- PEÑA, Enrique. MADERA, Carlos. SÁNCHEZ, Jesús. MEDINA, Javier. Bioprospección de plantas nativas para su uso en procesos de biorremediación: caso heliconia psittacorum (heliconiaceae). Rev. Acad. Colombia Cienc.: volumen XXXVII, número 145 - Diciembre 2013.

- PÉREZ, Marcos y ROJO, Carmen. Función depuradora de los humedales I: una revisión bibliográfica sobre el papel de los macrófitos. Instituto Cavanilles de Biodiversidad y Biología evolutiva Universidad de Valencia. Boletín SEHUMED. 2000.

- PIPELINE. Fall Decentralized Wastewater Treatment Systems. Natural and Enhanced Remediation Systems, Arcadis, Environmental science and engineering Series. Vol.11, No. 4. Plant & Soil Sciences e Library. Published quarterly by the National Small Flows Clearinghouse at West Virginia University 2000.

- RAVEN, Peter; RAY, Ever; EICHHORN, Susan. Biología de las plantas volumen 2 Reverté S.A España 1992

- RODRÍGUEZ y OSPINA. Humedales artificiales de flujo vertical para mejorar la calidad del agua del río Bogotá. Revista Ciencia e ingeniería Neogranadina, Noviembre No 15. Universidad Militar Nueva Granada. Redalyc. 2005.

- RODRÍGUEZ, Celia. Humedales construidos. Estado del arte”, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Ciudad de La Habana, Ingeniería hidráulica y ambiental, vol. XXIV, no. 3, 2003.

- RODRÍGUEZ, Gonzalo y RANGEL, Cristina. Estudio del sistema agroalimentario localizado, SIAL, de la concentración de fábricas de bocadillo de guayaba en las provincias de Vélez Y Ricaurte en Colombia”, Corporación colombiana de investigación agropecuaria, programa nacional de procesos agroindustriales centro de investigación CIMPA, Produmedios. 2005.

- RUEDA, Yamith. Estudio de la factibilidad técnica, económica y financiera de una planta de producción de bocadillo en el municipio de Guavatá (Santander), tesis Grado para optar título de ingeniero químico. 2006.
- SOON, P. y SEOK, Y. Water Quality Modeling Study Of the Nakdong River. Korea. Ecological Modelling, Volume 152, Issue 1, 15 June 2002. 65p.
- STEINER, G. R. Construction and operation guide lines for small constructed wetlands. Wastewater Treatment systems. 1993
- STOTTMEISTER, Wiebner. KUSCHK, Kappelmeye. KA"STNER, Bederski. MULLER, Moormann. Effects of plants and Microorganisms In Constructed Wetlands For Wastewater Treatment Elsevier. Germany. 2003.
- SUTHERSAN, S. Natural and enhanced remediation systems. Arcadis Lewis publishers. Boca Raton London New York Washington, D.C. 2002.
- TEJEDA, J. Diseño de un humedal para la remoción de Cd, As y Cr con plantas de *typha latifolia* (espadaña), tesis para obtener el grado de maestría en ciencias ambientales, 2010.
- TERRY, Norman y BAÑUELOS, Gary. Phytoremediation of Contaminated Soil and Water. 2000.
- VITORIA, Isidro. MARAVER, Francisco. SÁNCHEZ, Félix. ARMIJO, Francisco. Los nitratos y los nitritos y el agua de consumo. Agencia de protección de la salud y seguridad alimentaria. Junta de castilla y Aragón. 2009.