

**DISEÑO, EVALUACIÓN Y PUESTA EN MARCHA DE UNA UNIDAD DE  
TRATAMIENTO TERCIARIO CON FLUJO SUBSUPERFICIAL A ESCALA DE  
LABORATORIO PARA LA REMOCIÓN DE NITRÓGENO, FÓSFORO Y  
SULFUROS EN AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS, UTILIZANDO  
*PHRAGMITES AUSTRALIS*.**

**ANDRÉS ALBERTO SALAZAR FILLIPPO**

**NATALIA MARCELA PITTA OSSES**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

**FLORIDABLANCA**

**2013**

**DISEÑO, EVALUACIÓN Y PUESTA EN MARCHA DE UNA UNIDAD DE TRATAMIENTO TERCIARIO CON FLUJO SUBSUPERFICIAL A ESCALA DE LABORATORIO PARA LA REMOCIÓN DE NITRÓGENO, FÓSFORO Y SULFUROS EN AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS, UTILIZANDO *PHRAGMITES AUSTRALIS*.**

**ANDRÉS ALBERTO SALAZAR FILLIPPO**

**NATALIA MARCELA PITTA OSSES**

**Proyecto de Investigación presentado como requisito  
para optar por el título de Ingenieros Ambientales**

**Directora**

**PhD. Sandra Natalia Correa Torres**

**Co-directora**

**Msc. Yolanda Gamarra Hernández**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

**FLORIDABLANCA**

**2013**

## Tabla de contenido

<b>GLOSARIO.....</b>	<b>8</b>
<b>AGRADECIMIENTOS.....</b>	<b>10</b>
<b>DEDICATORIA.....</b>	<b>11</b>
<b>RESUMEN.....</b>	<b>¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.</b>
<b>Keywords: .....</b>	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
<b>1 INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>14</b>
<b>2 OBJETIVOS.....</b>	<b>16</b>
2.1 OBJETIVO GENERAL .....	16
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
<b>3 MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>17</b>
3.1 AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS .....	17
3.1.1 Efectos de contaminación por las aguas residuales .....	18
3.2 HUMEDALES.....	19
3.2.1 Humedales naturales .....	19
3.2.2 Humedales construidos (HC).....	19
3.2.3 Componentes de un humedal.....	19
3.3 MACRÓFITAS EN HUMEDALES ARTIFICIALES .....	22
3.3.1 Descripción general de macrófitas .....	22
3.3.2 Macrófitas de interés sanitario .....	23
3.4 HIDRÁULICA DE HUMEDALES CONSTRUIDOS CON FLUJO SUBSUPERFICIAL.....	27
3.4.1 Factores de diseño .....	27
3.4.2 Consideraciones de diseño .....	33
3.4.3 Evaluación hidráulica .....	34
3.4.4 Indicadores complementarios en evaluaciones hidráulicas .....	35

<b>4</b>	<b>METODOLOGÍA.....</b>	<b>39</b>
4.1	Diseño experimental.....	40
4.2	<b>FASE I Evaluación de las condiciones hidráulicas en cuanto a relación geométrica y medio filtrante .....</b>	<b>48</b>
4.2.1	Estimación de parámetros hidráulicos.....	48
4.3	<b>FASE II Evaluación de la capacidad de remoción de nitrógeno, fósforo y sulfuros de <i>P. australis</i> en aguas residuales domésticas, con las condiciones establecidas en el presente estudio .....</b>	<b>49</b>
4.3.1	Adaptación de <i>P. australis</i> en aguas residuales domésticas .....	49
4.3.2	Remoción de Nitrógeno, Fósforo y Sulfuros .....	50
4.4	<b>FASE III Establecimiento de las mejores condiciones de diseño para unidades de tratamiento terciario de acuerdo a los resultados obtenidos .....</b>	<b>51</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS Y ANÁLISIS .....</b>	<b>53</b>
5.1	<b>ANÁLISIS HIDRÁULICO .....</b>	<b>53</b>
5.1.1	Determinación del comportamiento hidráulico en la configuración 4:1 .....	53
5.1.2	Determinación del comportamiento hidráulico en la configuración 1:4 .....	56
5.2	<b>ANÁLISIS DE REMOCIÓN DE NITRÓGENO, FÓSFORO Y SULFUROS .....</b>	<b>60</b>
5.2.1	Remoción de contaminantes en configuración 4:1 .....	60
5.2.2	Remoción de contaminantes en configuración 1:4.....	62
5.2.3	Comparación de porcentajes de remoción con la literatura .....	63
5.3	<b>ANÁLISIS DE CRECIMIENTO VEGETAL .....</b>	<b>65</b>
5.4	<b>ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....</b>	<b>68</b>
5.4.1	Análisis estadístico de la variabilidad de los reactores en la configuración 4:1 .....	68
5.4.2	Análisis estadístico de la variabilidad de los reactores en la Configuración 1:4 .....	70
5.4.3	Evaluación de las mejores condiciones.....	71
<b>6</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>72</b>
<b>7</b>	<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>74</b>
<b>8</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>75</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. <i>Phragmites australis</i> . Fuente: Autores. ....	23
Figura 2. Curva 1-F(t), cantidad de trazador que permanece en el reator. ....	35
Figura 3. Parámetros en curva DTR. Fuente: Manual III, CEPIS. ....	37
Figura 5. Diseño del reactor a escala de laboratorio, vista superior de configuración 4:1. ....	43
Figura 6. Diseño del reactor a escala de laboratorio en vista superior de configuración 1:4. ....	44
Figura 7. Esquema de reactor a escala de laboratorio, en vista de perfil en configuración 4:1. ....	45
Figura 8. Esquema de reactor a escala de laboratorio en vista de perfil en configuración 1:4. ....	46
Figura 9. Vista superior de los reactores en configuración 1:4 y configuración 4:1 a escala de laboratorio. ....	47
<b>Figura 4. Esquema de reactores en vista de perfil, y localización de los individuos de <i>P. australis</i>.</b> ....	50
<b>Figura 10. Curvas DTR en configuración 4:1 para grava, control y arena.</b> ....	54
Figura 11. Curvas DTR en configuración 1:4 para grava, control y arena. ....	58
Figura 12. Promedio de resultados de remoción de N, P y S en configuración 4:1. ....	61
Figura 13. Promedio de resultados de remoción de N, P y S en configuración 1:4. ....	62
<b>Figura 14. Individuos de <i>P. australis</i> seleccionados</b> .....	65
Figura 15. Desarrollo radicular de <i>P. australis</i> en tanque control y tanque con arena. ....	66
Figura 16. Crecimiento medio de <i>P. australis</i> en configuración 4:1.....	67
Figura 17. Crecimiento medio de <i>P. australis</i> en configuración 1:4.....	68

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Composición típica promedio del Agua Residual Doméstica. ....	17
Tabla 2. Contaminantes de importancia en aguas residuales. ....	18
Tabla 3. Principales mecanismos de remoción y transformación de los contaminantes en los humedales. ....	21
Tabla 4. Ecuaciones químicas de remoción de nitrógeno, fósforo y sulfuros. ....	25
Tabla 5. Criterios típicos para el diseño de los humedales con flujo subsuperficial y la calidad de los efluentes esperados. ....	28
Tabla 6. Características de los medios empleados en los sistemas con flujo subsuperficial. ....	32
Tabla 7. Criterios de análisis por curva de tendencia. ....	38
Tabla 8. Parámetros de los reactores en planta piloto. ....	40
Tabla 9. Diseño experimental de los reactores. ....	41
Tabla 10. Hipótesis estadísticas. ....	51
Tabla 11. Caudales en reactores de acuerdo al medio filtrante. ....	53
Tabla 12. Parámetros hidráulicos principales en configuración 4:1. ....	53
Tabla 13. Criterios obtenidos por método Wolf-Resnick en configuración 4:1. ....	54
Tabla 14. Criterios de análisis por curva de tendencia en configuración 4:1. ....	55
Tabla 15. Parámetros hidráulicos principales en configuración 1:4. ....	57
Tabla 16. Criterios obtenidos por método Wolf-Resnick en configuración 1:4. ....	57
Tabla 17. Criterios de análisis por curva de tendencia en configuración 1:4. ....	59
Tabla 18. Revisión de porcentajes de remoción de nutrientes encontrados en la literatura. ....	64
Tabla 19. Resultados obtenidos en ANOVA de un factor para configuración 4:1. ....	69
Tabla 20. Pruebas post hoc de Scheffé y Dunnet para configuración 4:1. ....	70
Tabla 21. Resultados obtenidos en ANOVA de un factor para configuración 1:4. ....	70
Tabla 22. Pruebas post hoc de Scheffé y Dunnet para configuración 1:4. ....	71

## LISTA DE ANEXOS

Anexo 1. Análisis de conductibilidad en pruebas preliminares de grava, arena y agua potable.....	80
Anexo 2. Evaluación de adaptación y crecimiento de <i>P. australis</i> .....	81
Anexo 3. Resultados prueba de trazador. Conductividad (uS/cm) vs. tiempo en configuración 1:4.....	82
Anexo 4. Resultados prueba de trazador. Conductividad (uS/cm) vs. tiempo en configuración 4:1.....	87
Anexo 5. Datos iniciales para método de curva de tendencia configuración 4:1... 90	
Anexo 6. Datos de entrada para método de Wolf-Resnick.....	91
Anexo 7. Función concentración de salida (a.) y función de fracción remanente (b.) para Grava 4:1. ....	92
Anexo 8. Función concentración de salida (a.) y función de fracción remanente (b.) para Control 4:1.....	93
Anexo 9. Función concentración de salida (a.) y función de fracción remanente (b.) para Arena 4:1.....	94
Anexo 10. Datos iniciales para método de curva de tendencia configuración 1:4. 95	
Anexo 11. Función concentración de salida (a.) y función de fracción remanente (b.) para Grava 1:4.....	96
Anexo 12. Función concentración de salida (a.) y función de fracción remanente (b.) para Control 1:4. ....	97
Anexo 13. Función concentración de salida (a.) y función de fracción remanente (b.) para Arena 1:4. ....	98
Anexo 14. Resultados de remoción de Nitrógeno, Fósforo y Sulfuros, en mg/L, para configuración 1:4 y 4:1. ....	99
Anexo 15. Mediciones iniciales de los individuos seleccionados de <i>P. australis</i> en configuración 4:1.....	101
Anexo 16. Mediciones finales de los individuos seleccionados de <i>P. australis</i> en configuración 4:1.....	102
Anexo 17. Mediciones iniciales de los individuos seleccionados de <i>P. australis</i> en configuración 1:4.....	103
Anexo 18. Mediciones finales de los individuos seleccionados de <i>P. australis</i> en configuración 1:4.....	104
Anexo 19. Bomba peristáltica Masterflex 07519-25 de doce cartuchos.....	105
Anexo 20. Sistema radicular de <i>P. australis</i> post-adaptación. ....	106
Anexo 21. Reactores construidos para el tratamiento de agua residual doméstica a escala de laboratorio.....	107
Anexo 22. Individuos de <i>P. australis</i> en proceso de adaptación al agua residual doméstica.....	108

## GLOSARIO

**DETRITOS:** Resultado de la descomposición de una masa sólida en partículas.

**ENEAS:** Planta de la familia de las Tifáceas, que crece en sitios pantanosos, hasta dos metros de altura, con tallos cilíndricos y sin nudos, hojas envainadoras por la base, ensiformes, y flores en forma de espiga maciza y vellosa, de la cual la mitad inferior es femenina y masculina la superior. Sus hojas se emplean para hacer asientos de sillas, ruedos, etc.

**ESTOLÓN:** Vástago rastrero que nace de la base del tallo y echa a trechos raíces que producen nuevas plantas, como en la fresa.

**EUTROFIZACIÓN:** Incremento de sustancias nutritivas en aguas dulces de lagos y embalses, que provoca un exceso de fitoplancton.

**INTRA-GRUPOS:** Variación dentro de la muestra, cuantifica la dispersión de los valores de cada muestra con respecto a sus correspondientes medias.

**INTER-GRUPOS:** Variación entre muestras, cuantifica la dispersión de las medias de las muestras con respecto a la media global.

**FLUJO CONVECTIVO PLANTAS:** Es un mecanismo de transporte de oxígeno en el que el tallo de uno de los individuos es el encargado de la absorción de oxígeno y el desecho del metabolismo ( $\text{CO}_2$ ) es transportado mediante las raíces hacia un tallo en desarrollo para su excreción.

**HERBÁCEA:** Toda planta pequeña cuyo tallo es tierno y perece después de dar la simiente en el mismo año, o a lo más al segundo, a diferencia de las matas, arbustos y árboles, que echan troncos o tallos duros y leñosos.

**PECIOLO:** Pezón que sostiene la hoja.

**PLANTA PERENNE:** Planta que vive durante varias temporadas.



**QUELACIÓN:** Consiste en la administración de agentes quelantes a un medio con el fin de alterar sus condiciones naturales.

**REPRODUCCIÓN VEGETATIVA:** Es la que no se produce con la unión de los gametos, sino por fragmentación del individuo adulto.

## AGRADECIMIENTOS

Agradecemos en primera instancia a nuestra directora Sandra N. Correa y co-directora Yolanda Gamarra por seleccionarnos para este importante proyecto de investigación.

A la asesoría del profesor Álvaro Cajigas, cuyos consejos y sugerencias contribuyeron al mejoramiento de las condiciones de la experimentación. Al profesor Humberto Escalante, por el apoyo técnico referente al establecimiento de las condiciones hidráulicas y diseño experimental. A los docentes Marianela Luzardo y Alexander Sabogal, que orientaron en diferentes áreas de conocimiento la estadística aplicada al proceso de investigación.

A los profesores René Carreño y Miguel Ángel Reyes de la facultad de ingeniería mecánica, junto con sus auxiliares de laboratorio, por la localización del proyecto, asesoría en la optimización del sistema y su diligencia en múltiples tareas.

A Naydu Villamizar por su constante asistencia y buena disposición en la adquisición y uso de materiales y reactivos de laboratorio.

A la profesora Angélica Muskus por el préstamo de equipos y asesoría en la utilización de los mismos para el desarrollo de la experimentación. Al ingeniero César Rojas por el apoyo inicial mediante la adquisición y donación de los ejemplares de *P. australis*.

A la arquitecta Luz Astrid Ramírez por su asesoría y localización del proyecto en planta física. A Martica del departamento de investigaciones por su eficiencia y colaboración en los trámites administrativos.

Finalmente, destacamos en el proceso experimental y logístico a Don Luis Barrágan de servicios generales, y a los múltiples celadores, todos de gran importancia en esta extensa y desgastante labor.

## DEDICATORIA

Como es natural, priorizo en agradecer a mis padres y hermana por su apoyo incondicional a lo largo de mi vida universitaria, y especialmente durante el proyecto de investigación. A Camila, igualmente por su apoyo y paciencia, pues el proceso ha abarcado una parte considerable de mi tiempo.

Cabe resaltar que se incumplió aquella famosa tradición de finalizar el proyecto en discordia con su compañero; pretendamos que fue un gran éxito, felicitaciones Pitta.

Andrés A. Salazar F.

Agradezco a mis padres por su esfuerzo y apoyo incondicionales durante el desarrollo de mi carrera universitaria. A mis hermanos, por su compañía, paciencia y excelente disposición al afrontar momentos difíciles en estos años.

A César, por su comprensión, y apoyo desinteresado y altruista en esta compleja labor realizada durante el último año de vida universitaria.

Y a Andrés, por haber sido un excelente compañero de tesis, le agradezco.

Natalia Pitta O.

## RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

**TÍTULO:** DISEÑO, EVALUACIÓN Y PUESTA EN MARCHA DE UNA UNIDAD DE TRATAMIENTO TERCIARIO CON FLUJO SUBSUPERFICIAL A ESCALA DE LABORATORIO PARA LA REMOCIÓN DE NITRÓGENO, FÓSFORO Y SULFUROS EN AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS, UTILIZANDO *PHRAGMITES AUSTRALIS*.

**AUTOR(ES):** ANDRÉS ALBERTO SALAZAR FILLIPPO.  
NATALIA MARCELA PITTA OSSES.

**FACULTAD:** INGENIERÍA AMBIENTAL.

**DIRECTOR(A):** SANDRA NATALIA CORREA TORRES.

### RESUMEN

El presente estudio se realizó con el fin de determinar las condiciones hidráulicas idóneas para la remoción de nitrógeno, fósforo y sulfuros de agua residual doméstica, evaluados para una unidad de tratamiento terciario con flujo subsuperficial a nivel de laboratorio, mediante fitorremediación utilizando *Phragmites australis*. El estudio se dividió en 3 fases: la primera, un estudio de trazador para determinar las condiciones hidráulicas en cada reactor, analizando las variables configuración geométrica (4:1 y 1:4) y medio filtrante (grava y arena); la segunda, un análisis de remoción de contaminantes (N, P y S); y la tercera, un análisis gráfico y numérico de todos los resultados, con el fin de establecer las mejores condiciones para optimizar los procesos de remoción de contaminantes. Los resultados hidráulicos obtenidos indican que los reactores en configuración 4:1 presentan un comportamiento predominante de flujo a pistón, aunque los índices de cortos circuitos y zonas muertas (70%) corroboran la baja eficiencia de los mismos. Por otro lado, los reactores en configuración 1:4 presentan una mayor tendencia de flujo mezclado, y mayor estabilidad en cuanto a criterios hidráulicos que en la otra configuración. Los valores de remoción de contaminantes y crecimiento de las plantas indican mayor remoción de fósforo (50-90%) en todos los reactores y menor remoción de nitrógeno (hasta 13%). El mayor porcentaje de remoción se presentó en el reactor de grava 4:1. Según los datos obtenidos, las mejores condiciones para optimizar la remoción por parte de *P. australis* son configuración 4:1 y grava como medio filtrante.

**PALABRAS CLAVE:**

*Phragmites australis*, flujo subsuperficial, remoción de nutrientes, condiciones hidráulicas, material filtrante y configuración geométrica.

## GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

**TÍTULO:** DESIGN, EVALUATION AND OF A TERTIARY TREATMENT UNIT WITH SUBSURFACE FLOW IN LABORATORY SCALE FOR NITROGEN, PHOSPHORUS AND SULPHUR REMOVAL IN DOMESTIC WASTEWATER, USING *PHRAGMITES AUSTRALIS*.

**AUTHOR(S):** ANDRÉS ALBERTO SALAZAR FILLIPPO.  
NATALIA MARCELA PITTA OSSES.

**FACULTY:** ENVIRONMENTAL ENGINEERING.

**DIRECTOR:** SANDRA NATALIA CORREA TORRES.

### ABSTRACT

The research project was done in order to establish the optimal hydraulic conditions to remove nitrogen, phosphorus and sulphide in domestic wastewater, evaluated on a tertiary treatment unit with subsurface flow in laboratory scale, through phytoremediation using *Phragmites australis*. The methodology was detached in three phases: the first, a tracer study to determine the hydraulic conditions on each reactor, analyzing variables concerning to geometric relation (4:1 and 1:4) and filter material (gravel and sand); the second, pollutant removal analysis (N, P and S); and the third, the results' graphic and numeric analysis to optimize the pollutant removal processes. The hydraulic results indicate that the reactors with 4:1 relation display plug flow, although the short-circuiting and dead zones' (70%) indices corroborate their low hydraulic efficiency. On the other hand, the reactors with 1:4 relation display a higher trend to mixed flow, and higher stability in terms of hydraulic parameters. The pollutant removal values and growth of plants indicate higher phosphorus removal (50-90%) in all reactors and lower nitrogen removal ( $\leq 13\%$ ); gravel with 4:1 relation displayed the best removal rates. It was concluded that the best conditions to optimize the nutrient removal with *P. australis* are 4:1 relation and gravel as filter material.

### KEYWORDS:

Phragmites australis, subsurface flow, nutrients' removal, hydraulic conditions, filter material and geometric relation.

# 1 INTRODUCCIÓN

La utilización de humedales como tratamiento de aguas residuales se ha desarrollado e investigado ampliamente a nivel internacional desde 1970, en Estados Unidos y Europa, debido a la alta eficiencia de remoción reportada por los mismos, así como a su bajo costo de construcción y mantenimiento, en comparación con los sistemas convencionales empleados en Latinoamérica (Kadlec, 1996).

En Colombia, las técnicas de tratamiento empleadas actualmente, presentan inconvenientes operativos y requerimientos excesivos del sistema, lo cual exige la modificación e implementación de procesos, sistemas o alternativas correctivas, para incrementar la eficiencia de remoción y cumplir la normativa ambiental. Las cargas contaminantes en el efluente del agua residual doméstica, según la caracterización puntual realizada en el afluente de las PTAR municipales, se encuentran constituidas en su mayoría por nitrógeno (3.2 mg/L de  $\text{NH}_3$  y 0.05 mg/L de N orgánico), fósforo (1.35 mg/L de fósforo orgánico) y sulfuros (0.5 mg/L sulfuros).

El presente estudio utiliza el efluente del tratamiento secundario de la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) de un conjunto residencial localizado en el área metropolitana de Bucaramanga, el cual cuenta con una población aproximada de 280 habitantes. La PTAR está compuesta por un sistema preliminar de rejillado grueso y fino; tratamiento primario por medio de un sedimentador con lechos de secado de lodos; y el secundario consiste en un filtro biológico con aireación extendida. Por tanto, el efluente de la PTAR enunciada presenta un bajo contenido de materia orgánica y sólidos (suspendidos y disueltos), lo cual favorece la operación del sistema con flujo subsuperficial (humedal artificial) a manera de tratamiento terciario para la remoción de nutrientes.

La investigación evaluó la viabilidad técnica de un sistema de flujo subsuperficial con la especie *P. australis*, como tratamiento terciario para aguas residuales

domésticas de pequeñas comunidades urbanas o rurales. *P. australis* es una especie invasiva que, por su alta acumulación de biomasa, ha probado ser una excelente alternativa en procesos de remoción de nitrógeno, fósforo y sulfuros, lo cual corresponde a una etapa terciaria de tratamiento de aguas residuales (Santoyo *et al.*, 2007; Wathugala, 1987; Lee, 2009).

La implementación de un tratamiento convencional para la disminución de cargas contaminantes incluyen inconvenientes de ámbito operativo en la fase terciaria, tales como: liberación de olores, producción de vectores y eutrofización (Metcalf, 1998). Con el fin de solucionar dichas problemáticas se implementó una técnica de fitorremediación utilizando la planta *P. australis* en un tratamiento con flujo subsuperficial, en el cual se evaluaron el medio filtrante y la relación geométrica del diseño, y su influencia en la eficiencia hidráulica del sistema propuesto. El diseño experimental contempla las configuraciones 4:1 y 1:4, y como medio filtrante se empleó grava y arena.

El comportamiento hidráulico se evaluó mediante el tiempo de retención hidráulico (TRH), la estimación del índice de cortos circuitos, el índice de Morril, el método de Wolf-Resnick, los criterios de curva de tendencia y la tasa de recuperación del trazador, ya que tiene una incidencia directa en la remoción de contaminantes y en la eficiencia hidráulica del sistema. El análisis de resultados obtenidos y parámetros hidráulicos en el estudio de trazadores indican que existe mayor variabilidad de comportamiento entre los reactores de configuración 4:1, lo cual está relacionado con la distancia entre barreras y sus consecuentes altos porcentajes de zonas muertas. Para evaluar los resultados, se efectuó una comparación con los reportados en la literatura por Sabas (2011), Gonzalías (2007) y Wathugala (1987).

La remoción de contaminantes se evaluó empleando un TRH de 30 horas, mediante los análisis de nitrógeno total, fósforo total y sulfuros, teniendo en cuenta la absorción por parte de *P. australis*, la acción metabólica de los microorganismos de la rizosfera y de los consorcios microbianos presentes en el agua residual, y los mecanismos fisicoquímicos de remoción por parte del sustrato.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GENERAL

Determinar parámetros de diseño a través de la evaluación y puesta en marcha de una unidad de tratamiento terciario con flujo subsuperficial a escala de laboratorio para la remoción de nitrógeno, fósforo y sulfuros en aguas residuales domésticas, utilizando *Phragmites australis*.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Evaluar las condiciones hidráulicas en cuanto a relación geométrica y material filtrante, para la remoción de nitrógeno, fósforo y sulfuros como base para la selección de las mejores condiciones hidráulicas para las unidades de tratamiento.
- Evaluar la capacidad de remoción de nitrógeno, fósforo y sulfuros de *P. australis* en aguas residuales domésticas, con la condiciones establecidas en el presente estudio.
- Establecer las mejores condiciones de diseño para unidades de tratamiento de acuerdo a los resultados obtenidos.



### 3 MARCO TEÓRICO

#### 3.1 AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS

El agua residual (AR) está constituida por desechos líquidos provenientes de viviendas, instituciones, establecimientos comerciales e industriales, junto con otro tipo de aguas que estos pueden llegar a contaminar, es decir, aguas superficiales, subterráneas y de lluvia (Estrada, 2010).

Las propiedades y características físicas, químicas y biológicas de las AR dependen del tipo de fuente de la que proceden. De acuerdo a esta característica, las aguas residuales domésticas (ARD) presentan una serie de contaminantes tales como heces fecales, papel, jabón, residuos alimenticios, entre otras sustancias. Analíticamente, el contenido y concentración de dichos componentes se representa con parámetros como el color, DBO, DQO, turbiedad, sólidos (suspendidos y disueltos), pH, gases disueltos (amoníaco, dióxido de carbono, sulfuro de hidrógeno y oxígeno), contaminantes inorgánicos (amoníaco libre, nitrógeno orgánico y fósforo inorgánico). En la tabla 1 se presentan las características fisicoquímicas típicas del agua residual doméstica en el país.

**Tabla 1. Composición típica promedio del Agua Residual Doméstica.**

Parámetro	Valor Unidad	Valor Típico
<b>DBO<sub>5</sub></b>	mg/L	220
<b>Sólidos Totales</b>	mg/L	720
<b>Sólidos Disueltos</b>	mg/L	500
<b>Sólidos Disueltos Volátiles</b>	mg/L	20
<b>Sólidos Suspendidos</b>	mg/L	220
<b>Sólidos Suspendidos Volátiles</b>	mg/L	165
<b>Sólidos Sedimentables</b>	mL/L	10
<b>Nitrógeno Amoniacal</b>	mg/L	25
<b>Nitrógeno Orgánico</b>	mg/L	15
<b>Nitrógeno Total</b>	mg/L	40
<b>Fósforo Total</b>		
<b>Fósforo Orgánico</b>	mg/L	8
<b>Fósforo Inorgánico</b>	mg/L	3
<b>Grasas</b>	mg/L	5
<b>Coliformes Totales</b>	Num/100mL	10 <sup>8</sup>
<b>Temperatura</b>	°C	21
<b>pH</b>	Adimensional	7.2

Fuente: Romero, 1994.

### 3.1.1 Efectos de contaminación por las aguas residuales

Toda agua residual causa algún efecto en el cuerpo de agua receptor; no obstante, el concepto de contaminación se reduce a la introducción de condiciones o características que lo transformen hasta hacerlo inaceptable para el uso propuesto de la misma (consumo, recreación y riego). En la tabla 2 se presentan los contaminantes de mayor importancia en aguas residuales, así como el parámetro de medida correspondiente.

**Tabla 2. Contaminantes de importancia en aguas residuales.**

Contaminante	Parámetro de medida	Impacto ambiental
<b>Materia Orgánica Biodegradable</b>	DBO, DQO	Desoxigenación del agua, generación de olores indeseables.
<b>Materia Suspendida</b>	SST, SSV	Causa turbiedad en el agua, deposita lodos.
<b>Patógenos</b>	CF	Hace el agua insegura para consumo y recreación.
<b>Amoníaco</b>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	Desoxigena el agua, es tóxico para organismos acuáticos y puede estimular el crecimiento de algas.
<b>Fósforo</b>	Ortofosfatos	Puede estimular el crecimiento vegetal.
<b>Materiales Tóxicos</b>	-	Peligrosos para la vida vegetal y animal.
<b>Sales Inorgánicas</b>	SDT	Limita los usos agrícolas e industriales del agua.
<b>Energía Térmica</b>	Temperatura	Reduce la concentración de saturación de oxígeno en el agua, acelera el crecimiento de organismos acuáticos.
<b>Iones Hidrógeno</b>	pH	Riesgo potencial para organismos acuáticos.

Fuente: Romero, 1994.

La carga contaminante de aguas residuales en el afluente de plantas de tratamiento es una variable dependiente del caudal, y está sujeta a fluctuaciones generadas por: el tipo de alcantarillado usado, la diferencia en las costumbres de la comunidad aportante, el régimen de operación de las industrias servidas, el clima, la época del año y la hora del día.

## **3.2 HUMEDALES**

Un humedal es un área de transición entre tierra y agua, formado por un cuerpo de agua léntico o lótico, temporal o permanente, en los que el agua es el componente fundamental para el transporte de materiales y energía, y cuya profundidad es menor de 6 metros en marea baja. Consisten en estructuras compuestas de agua, un sustrato y, generalmente, vegetación vascular. (RAMSAR, 1971).

### **3.2.1 Humedales naturales**

Debido a su importancia ecológica, como regulador de los regímenes hidrológicos y como hábitat de flora y fauna características, su conservación y preservación son prioridad internacional (RAMSAR, 1994). Su función es depurar agua cargada con compuestos orgánicos, y además puede ser usado por sus servicios ecosistémicos y recreativos.

### **3.2.2 Humedales construidos (HC)**

Los humedales construidos son similares a los naturales en estructura y funcionamiento interno, ya que su diseño obedece a mecanismos de remoción de contaminantes por medios químicos, físicos y biológicos, como la sedimentación, la adsorción a las partículas del suelo, la asimilación por las plantas y la transformación microbiana (Estrada, 2010).

### **3.2.3 Componentes de un humedal**

#### **3.2.3.1 Agua**

Su importancia radica en que los cambios en los patrones de precipitación y evapotranspiración de la zona pueden afectar drásticamente la eficiencia del humedal y la vegetación presente. De igual manera, la densidad de las plantas y microorganismos afecta el caudal del sistema, mediante los tallos, hojas, raíces y la obstrucción de luz al sustrato (Estrada, 2010).

#### **3.2.3.2 Sustrato**

Generalmente se usa suelo, arena, grava, rocas, materia orgánica o una mezcla de todos. Los sedimentos se acumulan en el lecho del humedal, y su importancia radica en que ofrecen un medio de soporte para los microorganismos, en el cual,

además de quedar atrapados varios grupos de contaminantes, se genera carbono, que es el combustible para que se lleven a cabo las reacciones microbianas (Estrada, 2010). Adicionalmente, al ser un ambiente anóxico, el sustrato permite reacciones de reducción, que son la base de la remoción de contaminantes como nitrógeno y metales (Gonzalías, 2007).

### **3.2.3.3 Vegetación**

Las plantas vasculares contribuyen al tratamiento de agua residual y afectan la escorrentía del sistema mediante la estabilización de la velocidad del flujo a través del sustrato. Las plantas que con más frecuencia se utilizan son: las espadañas o enneas (*Typha sp.*), la caña o junquillo (*Phragmites communies*), y los juncos (*Juncos sp.*, *Scirpus sp.* y *Carex sp.*) (Vymazal, 2005).

### **3.2.3.4 Microorganismos**

Incluyen bacterias, levaduras, hongos y protozoos. Hacen parte fundamental del funcionamiento del humedal, debido a que metabolizan sustancias orgánicas e inorgánicas mediante reacciones redox y reciclan nutrientes dentro del sistema. Debido a que en el sustrato hay zonas con oxígeno y otras sin oxígeno, la mayor parte de las bacterias son anaerobias facultativas (Santoyo *et al.*, 2007).

### **3.2.3.5 Animales**

Los humedales proveen un hábitat adecuado para invertebrados, como insectos y gusanos. En su estado larval, consumen detritos y materia orgánica (Estrada, 2010).

### **3.2.3.6 Mecanismos de remoción en los humedales**

De acuerdo al análisis del tipo de remoción efectuado en el humedal, existe una clasificación que, según el componente o contaminante a eliminar, determina el tipo de mecanismo que efectuará la remoción en el humedal, ya sea físico, químico o biológico (Arias, 2010).

### **3.2.3.7 Limitaciones de los humedales construidos**

La mayor limitante para la aplicación de un humedal como sistema de tratamiento es el área que éste ocupa; por tanto, es necesario evaluar el ahorro económico de construcción y mantenimiento, considerando los costos del terreno. De igual

manera, debido a sus características biológicas, los niveles de remoción en el humedal pueden variar de acuerdo a condiciones ambientales, como lluvias o períodos de sequía. El estudio de este tipo de sistema tiene un alto grado de complejidad, debido a la gran cantidad de variables físicas, químicas y biológicas que alteran la eficiencia del sistema y la consistencia de la remoción (Estrada, 2010).

**Tabla 3. Principales mecanismos de remoción y transformación de los contaminantes en los humedales.**

Constituyente del agua residual	Mecanismo de remoción
<b>Sólidos suspendidos</b>	Sedimentación/Filtración.
<b>Materia orgánica biodegradable (DBO)</b>	Degradación microbiana (aerobia, anaerobia, facultativa). Sedimentación/Filtración.
<b>Nitrógeno</b>	Amonificación seguida por la nitrificación-denitrificación bacteriana. Volatilización del amonio. Toma por la planta.
<b>Fósforo</b>	Porción en el suelo (reacciones de adsorción-precipitación con el aluminio, hierro, calcio y minerales de la arcilla en el suelo). Toma por la planta.
<b>Metales pesados</b>	Sedimentación. Adsorción sobre la superficie de la planta y los detritos.
<b>Patógenos</b>	Sedimentación/Filtración. Muerte natural. Radiaciones ultravioleta. Excreción de antibióticos por las raíces de las plantas.

Fuente: Brix H, 1993; Cites and Tchobanoglous, 1998.

### **3.2.3.8 Clasificación por régimen de flujo**

Las características del humedal pueden variar para adaptarse a las condiciones ambientales y mejorar la eficiencia de remoción del sistema, ya sea en sus características físicas, en el tipo de sustrato utilizado o en la dirección del flujo (puede ser vertical u horizontal). La siguiente clasificación es reconocida por Arias (2010) y Estrada (2010):

#### **Flujo libre**

Su funcionamiento se basa en el contacto permanente del cuerpo de agua con la atmósfera, y por la presencia de vegetación herbácea y macrófitas emergentes. La

profundidad del agua varía entre 5 y 90 cm., pero suelen encontrarse en el rango de 30-40 cm.

### **Flujo superficial (FS)**

Consiste en una cuenca de agua poco profunda, suelo o un medio de soporte para las raíces de las plantas y una estructura que permita mantener la profundidad del agua. La superficie del agua se encuentra por encima del sustrato, y se caracteriza por ser aerobia en la superficie y anaerobia en la parte más profunda.

### **Flujo subsuperficial (FSS)**

Consiste en una cuenca con el fondo sellado, rellena de un material filtrante (usualmente, grava o arena) y caracterizada porque se diseña para que el nivel del agua siempre está por debajo del nivel del sustrato. Debido a sus condiciones hidráulicas, el mejor tratamiento de este tipo de humedal se da a las aguas residuales con baja concentración de sólidos y flujo relativamente constante. Sus ventajas son mayor tolerancia a los cambios de temperatura y disminución de olores y vectores. Debido a que existe mayor área de contacto para los microorganismos, el tratamiento en FSS es mejor y más rápido que en FS, aunque su construcción y mantenimiento sean más costosos.

## **3.3 MACRÓFITAS EN HUMEDALES ARTIFICIALES**

### **3.3.1 Descripción general de macrófitas**

Las macrófitas helófitas (emergentes) utilizadas en tratamiento de aguas residuales, conforman un grupo de interés sanitario como consecuencia de sus características físicas y metabólicas. De éstas se destacan: alta acumulación de biomasa, altura y multiplicidad de tallos; también es de gran importancia que las especies en cuestión presenten tolerancia a altas cargas orgánicas y de nutrientes, y que posean un desarrollo subterráneo masivo de raíces y rizomas (Lee, 2009; Vymazal, 2005).

### 3.3.2 Macrófitas de interés sanitario

El tipo de vegetación más utilizado para el tratamiento de agua residual por medio de humedales construidos son las macrófitas o plantas acuáticas superiores (Estrada, 2010). Las siguientes son las variedades más destacadas.

#### 3.3.2.1 Vegetación flotante

Este tipo de vegetación es comúnmente utilizada en humedales construidos con flujo superficial, ya que su morfología no requiere medio de soporte para el tallo o las raíces, y su metabolismo incluye remoción de contaminantes presentes en aguas residuales domésticas. Las más importantes incluyen *Eichhcornia crassipes*, *Lemna spp.*, *Scirpus spp.*

#### 3.3.2.2 Vegetación emergente

La implementación de este tipo de vegetación se limita a sistemas con régimen de flujo subsuperficial, ya que requieren un medio de soporte para el desarrollo radicular, y la absorción de nutrientes se ve condicionada por mecanismos físicos de remoción del medio filtrante. *Typha spp.* y *Phragmites australis*, son consideradas las plantas de mayor importancia sanitaria (Lara, 1999).

#### 3.3.2.3 *Phragmites australis*



Taxonomía

**Orden:** *Cyperales*.

**Familia:** *Poaceae*.

**Género:** *Phragmites*.

**Nombre científico:** *Phragmites australis*.

**Nombre común:** Caña o carrizo.

Morfología

Es una gramínea perenne de distribución cosmopolita en terrenos anegados, por lo que su hábitat natural corresponde a humedales, laderas de

Figura 1. *Phragmites australis*. Fuente: Autores.

arroyos y lagos; se reproduce por crecimiento clonal con estolones y rizomas. La acumulación de biomasa aproximada en su estructura aérea es del 20%, alcanzando una longitud media de 4,5m y grosor entre 5-15mm (Vymazal, 2005; Curt).

A nivel subterráneo alberga el 80% de la biomasa, compuesta por rizomas de crecimiento horizontal (2 a 20m), y tejido radicular que penetra el suelo verticalmente a una profundidad de 1-2 metros con múltiples bifurcaciones; las plantas alcanzan un crecimiento subterráneo (biomasa radicular) máximo en un lapso de tres a cinco años (Lara, 1999; Vymazal, 2005; Kalipci, 2011).

#### Metabolismo:

Presenta una alta capacidad de proliferación y adaptación, y un bajo valor alimenticio que evita el consumo por parte de mamíferos, pájaros e insectos, a diferencia de otras especies utilizadas en fitodepuración (Lara, 1999). Presenta una tolerancia a DQO hasta de 128 mg/L, temperaturas entre 12-25°C, salinidad máxima de 45 partes por trillón (ppt) y pH aproximado de 2-8 (Gonzalías, 2007).

El metabolismo de *P. australis* puede ser afectado por variaciones de pH que divergen del rango 4.8-8.2, tal como lo generan ciertos procesos de oxidación-reducción de sulfuros. En estos casos, la toxicidad de los sulfitos producidos en concentraciones mayores a 1mM, pueden causar una disminución notable en el desarrollo de la rizosfera, muerte de brotes, aparición de tejidos tumorales, reducción de la capacidad fotosintética de las hojas, y mortandad de microorganismos asociados, y reducir notablemente la eficiencia del sistema. Por tanto, es prioritario tener en cuenta las concentraciones máximas de compuestos sulfurados en el agua a tratar (Wiessner, 2008; Gonzalías, 2007).

#### Dinámica de remoción:

El tratamiento de aguas residuales utilizando humedales artificiales con macrófitas debe su eficiencia en gran parte a la actividad microbiótica en la zona radicular de las plantas, donde se desarrollan principalmente consorcios de bacterias y protozoos. Éstos presentan un alto grado de abundancia y diversidad como consecuencia de las zonas aerobias generadas por el metabolismo y morfología



vegetal. *P. australis* se encuentra provista de espacios vacíos en sus tejidos que liberan oxígeno transferido de la estructura aérea a la subterránea (por difusión y flujo convectivo), favoreciendo así la degradación bioquímica de materia orgánica y nutrientes (Arias, 2010; Lee, 2009; Gonzalías, 2007; Ramírez, 1994; Wathugala, 1987).

La dinámica de remoción puede ser descrita en tres fases: química, física y biológica. Complejos procesos de quelación, adsorción y precipitación corresponden a la fase química y son responsables de la remoción de fósforo, donde la porosidad del sustrato cumple un rol vital (mayor porosidad representa mayor eficiencia de remoción) (Gonzalías, 2007).

En términos biológicos, se destaca la oxidación de carbono, nitrógeno y azufre por parte de bacterias aerobias y facultativas, y la subsiguiente desnitrificación ejecutada en zonas anaerobias del sistema; pese a que las zonas anaerobias son prioritarias para la desnitrificación, éstas resultan desfavorables para la remoción de fósforo (Romero *et al.*, 1999).

Finalmente, la fase física implica la sedimentación de material particulado suspendido y la filtración inherente del medio (grava o arena), causante de la colmatación de unidades con flujo subsuperficial, razón por la cual resulta conveniente que estos sistemas sean implementados como tratamiento terciario (Lara, 1999). En la tabla 4 se presenta un resumen de las dinámicas de remoción para nitrógenos, fosforo y sulfuros.

**Tabla 4. Ecuaciones químicas de remoción de nitrógeno, fósforo y sulfuros.**

Contaminante	Reacción
<b>NITRÓGENO</b>	Fijación: $2N_2 + 3CH_2O + 3H_2O + 4H^+ \rightarrow 3CO_2 + 4NH_4$ Nitrificación: $\frac{1}{4}O_2 + \frac{1}{8}NH_4^+ \rightarrow \frac{1}{8}NO_3^- + \frac{1}{4}H^+ + \frac{1}{8}H_2O$ $\frac{1}{4}O_2 + \frac{1}{6}NH_4^+ \rightarrow \frac{1}{6}NO_2^- + \frac{1}{3}H^+ + \frac{1}{6}H_2O$ $\frac{1}{4}O_2 + \frac{1}{2}NO_2 \rightarrow \frac{1}{2}NO_3^-$ Reducción de Nitrate: $\frac{1}{2}NO_3^- + \frac{1}{4}CH_2O \rightarrow \frac{1}{2}NO_2^- + \frac{1}{4}H_2O + \frac{1}{4}CO_2$ Denitrificación: $\frac{1}{2}NO_3^- + \frac{1}{4}CH_2O + \frac{1}{5}H^+ \rightarrow \frac{1}{10}N_2 + \frac{1}{4}CO_2 + \frac{7}{20}H_2O$
<b>FÓSFORO</b>	Hidrólisis: $R-O-P(XOR) - OAr \rightarrow R-O-P(XOR) - OH + HOAr$
<b>AZUFRE</b>	Oxidación de sulfuro/azufre: $2H_2S + O_2 \rightarrow 2S + 2H_2O$ $2S + 2H_2O + 3O_2 \rightarrow 4H + 2SO_4^{2-}$

Fuente: Autores.

Las plantas cumplen también un rol vital en estas fases de remoción, pues utilizan y almacenan nutrientes en su proceso de crecimiento y suministran oxígeno a la microbiota adherida a la rizosfera (proceso bioquímico), aumentan el tiempo de retención hidráulico y proveen área superficial y carbono orgánico (degradación de tejidos vegetales muertos) para el desarrollo de microorganismos, y contribuyen a la incorporación de fósforo en el sustrato (físico). La remoción directa de nitrógeno por parte de *P. australis* corresponde al 10-15%. No obstante, la actividad simbiótica con microorganismos asociados puede llevar a porcentajes superiores al 80% (Lara, 1999; Ramírez, 1994; Wathugala, 1987).

El fósforo es tomado por plantas acuáticas en forma de ortofosfato ionizado ( $\text{PO}_4$ ,  $\text{HPO}_4$ ,  $\text{H}_2\text{PO}_4$ ,  $\text{H}_3\text{PO}_4$ ) y su solubilidad depende del pH del agua (las condiciones ácidas favorecen la acumulación) y el contenido de compuestos de hierro y calcio. El fósforo que entra a los sistemas lénticos se deposita en los sedimentos y algunas fracciones se disuelven nuevamente cuando el agua en contacto con los sedimentos es reductora (bajo nivel de oxígeno y alto  $\text{CO}_2$ ) (Restrepo, 2004).

El nitrógeno es asimilado como nutriente por la planta en forma de nitrato. En este proceso la aireación juega un rol importante en la nitrificación y permite la producción de lodos activados (Manahan, 2005). La remoción de nitratos ( $\text{NO}_3^-$  por vía de una desnitrificación biológica) en humedales, requiere condiciones anóxicas, una adecuada fuente de carbono y condiciones adecuadas de temperatura. La presencia de condiciones anóxicas está garantizada en el fondo de los humedales construidos y la temperatura del agua depende del clima local y de la estación, así que la disponibilidad de una fuente adecuada de carbono tiende a ser el factor que controla el proceso de remoción (Lee, 2009; Santoyo *et al.*, 2007; Romero *et al.*, 1999).

Los compuestos de azufre son muy comunes en aguas naturales, en las que se encuentra el ion sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) en diferentes concentraciones. Compuestos de sulfuros, de origen natural y de especies contaminantes están presentes en sistemas acuáticos naturales, y la degradación de estos compuestos es importante

por sus procesos microbianos. La degradación de subproductos, tales como H<sub>2</sub>S, son tóxicos y deterioran la calidad del agua (Gonzalías, 2007; Weisner, 2008).

### **3.4 HIDRÁULICA DE HUMEDALES CONSTRUIDOS CON FLUJO SUBSUPERFICIAL**

#### **3.4.1 Factores de diseño**

Con el fin de asegurar la eficiencia hidráulica de los reactores a diseñar, se tiene en cuenta la influencia directa en la hidrodinámica de factores como el tipo de medio filtrante, la relación geométrica (L:A) y la configuración del sistema, los cuales pueden afectar el tiempo de retención real (Sabas 2011). La distribución uniforme del flujo en el volumen útil de cada reactor permitirá un mayor tiempo de contacto de los contaminantes en el sistema y optimizará la remoción de los mismos.

Los humedales a flujo subsuperficial no presentan un régimen ideal de flujo y probablemente están en algún punto intermedio entre el pistón y el completamente mezclado (Peña, 2003). No obstante, en el diseño de humedales, considerados como reactores biológicos de biomasa adherida, se estima la remoción de nitrógeno, fósforo y sulfuros de acuerdo con una cinética de primer orden para un reactor con flujo pistón. Por tanto, se tienen en cuenta las relaciones básicas para ese tipo de reactor:

$$C = C_0^{-Kt} \quad (1)$$

Donde,

C: Concentración del contaminante efluente (mg/L)

Co: Concentración del contaminante afluente (mg/L)

K: Constante de velocidad de reacción de primer orden, dependiente de la temperatura. (d<sup>-1</sup>)

t: Tiempo de retención hidráulica. (d)

En humedales, el tiempo de retención hidráulico puede ser calculado usando la ecuación (2).

$$t = \frac{L*W*d*n}{Q} \quad (2)$$

t: Tiempo de retención hidráulico (día)

Q: Caudal (m<sup>3</sup>/día)

L: Longitud del estanque. (m)

W: Ancho del estanque. (m)

d: profundidad del agua en el estanque. (m)

n: porosidad, o espacio utilizado por el agua para fluir a través del humedal.

En los humedales con flujo subsuperficial (FSS) el medio, las raíces y otros sólidos ocupan un espacio. La porosidad ilustra ese espacio en porcentaje y se expresa en forma decimal.

Q: Flujo promedio a través del humedal. (m<sup>3</sup>/d)

El área de la sección transversal del lecho así como el ancho del mismo son independientes de la temperatura y de la carga orgánica ya que ellos son controlados por las características hidráulicas del medio. Los criterios de diseño propuestos por Crites y Tchobanoglous (1998) aparecen en la tabla 5.

**Tabla 5. Criterios típicos para el diseño de los humedales con flujo subsuperficial y la calidad de los efluentes esperados.**

Parámetro de diseño	Unidad	Valor
<b>Tiempo de retención</b>	D	3-4
<b>Velocidad de carga orgánica</b>	Kg/ha*d	<110
<b>Velocidad de carga de SST</b>	Kg/m <sup>2</sup> *d	0.04
<b>Profundidad del agua</b>	m	0.3-0.61
<b>Profundidad del medio</b>	m	0.46-0.76
Calidad esperada para los efluentes		
<b>DBO<sub>5</sub></b>	mg/L	<20
<b>SST</b>	mg/L	<20
<b>NT</b>	mg/L	<10
<b>PT</b>	mg/L	<5

Fuente: Romero *et al.*, 1999.

#### **3.4.1.1 Tiempo de retención hidráulica nominal**

El tiempo que el agua permanece en el sistema se conoce como el tiempo de retención hidráulico (TRH), el cual se asocia con el tiempo necesario para que se lleven a cabo los procesos requeridos para garantizar un tratamiento adecuado. El TRH bajo condiciones de flujo de ideal, conocido como TRH nominal ( $\tau_n$ ), puede ser definido por la ecuación (3), mediante la relación entre el volumen de agua útil (V) dividido por el caudal de agua (Q) (Sabas, 2011).

$$\tau_n = \frac{V}{Q} \quad (3)$$

$\tau_n$ : Tiempo de retención hidráulica nominal (h).

V: Volumen de agua en el humedal ( $m^3$ ).

Q: Flujo ( $m^3/h$ ).

#### **3.4.1.2 Volumen nominal**

Es el volumen de agua útil dentro del reactor, y se calcula teniendo en cuenta la altura de la lámina de agua y la porosidad del medio, como ilustra la ecuación (4).

$$V = \varepsilon * h * S \quad (4)$$

V= Volumen nominal ( $m^3$ ).

$\varepsilon$ = Porosidad del medio.

h= Profundidad de agua (m).

S= Área superficial ( $m^2$ ).

#### **3.4.1.3 Tasa de recuperación de trazador**

Es el volumen de trazador que sale del reactor, según la curva de la Distribución de Tiempos de Residencia (DTR). El porcentaje recuperado en la salida se obtiene mediante una relación porcentual, dividiendo la masa recuperada ( $M_o$ ) por la masa aplicada ( $M_t$ ), como se muestra en la ecuación (5). Es una medida indirecta de la

eficiencia hidráulica del reactor y de la influencia del tipo de material filtrante en la misma.

$$\%R = \frac{\int_0^{\infty} Q(t) * C(t) dt}{M_t} * 100 \quad (5)$$

%R: Porcentaje de recuperación del trazador.

Q(t): Flujo en función de tiempo (m<sup>3</sup>/h).

C(t): Concentración trazador en función de tiempo (g/m<sup>3</sup>).

M<sub>t</sub>: Masa aplicada de trazador (g).

#### **3.4.1.4 Tiempo de residencia E(t)**

Es el tiempo en que cada una de las partículas o moléculas permanece dentro de un sistema o reactor. Se determina usando la ecuación (6).

$$E(t) = \frac{Q(t) * C(t)}{\int_0^{\infty} Q(t) * C(t) dt} \quad (6)$$

#### **3.4.1.5 Tiempo de retención hidráulica real (τ)**

Es el tiempo que el agua permanece en el sistema, y se asocia con el tiempo necesario para que se lleven a cabo los procesos requeridos para garantizar un tratamiento adecuado. Se calcula usando la ecuación (7).

$$\tau = \int_0^{\infty} t * E(t) dt \quad (7)$$

t= Tiempo (h).

E(t)= Función de distribución de tiempo de retención (h<sup>-1</sup>).

#### **3.4.1.6 Normalización DTR**

La normalización de la DTR se realiza para remover las unidades de flujo, volumen del sistema y masa del trazador, con el fin de hacer posible la comparación entre curvas de reactores en condiciones de operación diferentes. La normalización de la gráfica de distribución del tiempo de retención hidráulica consiste en hacer adimensionales los ejes, usando las ecuaciones (8) para el tiempo y (9) para la conductividad.

$$\phi = \frac{t_d}{\tau} \quad (8)$$

$\tau$  = Tiempo de retención normalizado.

$t_d$  = Tiempo de retraso (h).

$$E\theta(t) = \frac{C_i}{C_o} \quad (9)$$

$C_i$  = Concentración del trazador en el efluente al tiempo  $T_i$  (mg/L)

$C_o$  = Concentración inicial del trazador (cantidad de trazador aplicado en la entrada, dividido por el volumen útil del reactor, mg/L).

La grafica de distribución permitirá establecer el flujo predominante, para estimar los parámetros hidrodinámicos como la eficiencia hidráulica, el índice de cortos circuitos y el índice de Morril.

#### **3.4.1.7 Tipo de medio filtrante**

De la porosidad y la permeabilidad en el medio filtrante depende la conductividad hidráulica en el interno del sistema. Entre menor sea el diámetro del medio se producen mejores eficiencias de remoción. Las consecuencias de utilizar estos medios es que con el tiempo se colmatan y pueden producir un colapso hidráulico, es por esto que se utiliza grava como medio de soporte (Sabas 2011, Santoyo *et al.*, 2007).

En los humedales con flujo subsuperficial los mecanismos básicos de remoción son los mismos que para un sistema con flujo libre, sin embargo, en el sistema con flujo subsuperficial la velocidad de remoción puede ser mayor debido a que en este tipo de sistema hay una mayor área superficial sumergida y por tanto presentará un potencial mayor para el crecimiento de los microorganismos adheridos. Según Reed *et al.* (1988) un metro cúbico de un lecho de un humedal conteniendo grava con tamaño de 25 mm presenta un área superficial de al menos 146 m<sup>2</sup>, además de la superficie que proporcionan las raíces; mientras que en un

sistema con flujo libre con un volumen semejante pudiera contener entre 15 y 50 m<sup>2</sup> de área superficial utilizable.

Las ecuaciones planteadas pueden ser aplicadas para un sistema con flujo subsuperficial y las únicas diferencias son la magnitud de la porosidad (n) y la constante de velocidad de reacción. Para los sistemas con flujo subsuperficial la porosidad varía con el tipo de medio usada en el sistema, en la tabla 6 se indican las características de los medios normalmente empleados en sistemas con flujo subsuperficial.

**Tabla 6. Características de los medios empleados en los sistemas con flujo subsuperficial.**

Tipo de medio	Tamaño efectivo D <sub>10</sub> (mm)	Porosidad n	Conductividad hidráulica (ks) m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> *d
<b>Arena gruesa</b>	2	28-32	100-1000
<b>Arena gravosa</b>	8	30-35	500-5000
<b>Grava fina</b>	16	35-38	1000-10000
<b>Grava media</b>	32	36-40	10000-50000
<b>Roca gruesa</b>	128	38-45	50000-250000

Fuente: Reed *et al.*, 1988.

La ley de Darcy describe el régimen de flujo en un medio poroso y es aceptada para ser utilizada en el diseño de los humedales con flujo subsuperficial que utilizan como medio en el lecho, suelo o grava. Dicha ecuación es la siguiente:

$$Q = K_s * A_c * S \quad (10)$$

Donde,

Q: flujo promedio a través del humedal (m<sup>3</sup>/d)

K<sub>s</sub>. Conductividad hidráulica de una unidad de área del humedal perpendicular a la dirección del flujo (m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> \*d).

A<sub>c</sub>: Área de la sección transversal perpendicular al flujo (m<sup>2</sup>)

S: Gradiente hidráulico o pendiente del lecho (como una fracción decimal).



El área de la sección transversal del lecho en el humedal puede ser calculado por sustitución en la ecuación de Darcy:

$$A_c = Q * K_s * S \quad (11)$$

Según Metcalf y Eddy (1995) los humedales con flujo subsuperficial horizontal deben ser diseñados para que la velocidad del flujo definida por el producto ( $K_s * S * 5$ ) no debe ser mayor de 6,8 m/d para minimizar el arrastre de la película biológica.

La profundidad del medio en los sistemas con flujo subsuperficial está directamente relacionada con la profundidad de penetración de las raíces y rizomas de las plantas, pues éstas son las que suministran el oxígeno al sistema. La penetración de las raíces de las principales plantas utilizadas en los humedales construidos con flujo subsuperficial supera los 60 cm (Reed *et al.*, 1988).

#### **3.4.1.8 Geometría (relación L:A)**

La geometría del reactor y la forma son importantes en el desempeño hidrodinámico, ya que de estos dependen la localización y abundancia de zonas estancadas y de flujos preferenciales. (Sabas, 2011; García, 2004; Gonzalías, 2007).

#### **3.4.1.9 Configuración (por baffles o islas)**

Varios estudios han reportado que la presencia de baffles en sistemas de humedales aumenta la eficiencia hidráulica y el desempeño del sistema. De igual forma se han reportado resultados en humedales construidos con flujo superficial, pero los estudios de flujo subsuperficial se encuentran en fases atrasadas de investigación (Sabas, 2011).

#### **3.4.2 Consideraciones de diseño**

Para el adecuado desarrollo de las *P. australis*, es esencial que el sustrato permanezca saturado de agua; por tanto, se debe diseñar una altura útil de longitud igual o menor al tamaño potencial de las raíces, con el fin de reducir las zonas anóxicas y favorecer la nitrificación (Ramírez *et al.*, 1994). El lecho debe tener una pendiente típica menor a 2% (pero puede llegar hasta 6%), el medio

tiene una profundidad de entre 0.3 y 0.7 metros. En humedales artificiales es posible impermeabilizar el medio circundante, de manera que la porosidad del suelo sea menor a 50% (Ramírez *et. al.* 1994).

#### **3.4.2.1 Comportamiento hidráulico**

Los humedales a flujo subsuperficial no presentan un régimen ideal de flujo y probablemente están en algún punto intermedio entre el pistón y el completamente mezclado (Peña *et. al.*, 2003). El modelo de flujo a pistón en condiciones de estado estacionario está dado por la ecuación (12).

$$\frac{C_e}{C_o} = e^{-k_T * T} \quad (12)$$

$C_e$  y  $C_o$ : Concentración en el efluente y el afluente [mg/L]

$K_T$ : Constante de reacción de primer orden [ $d^{-1}$ ]

T: Tiempo de retención hidráulico [d]

#### **3.4.3 Evaluación hidráulica**

El comportamiento hidráulico en sistemas de tratamiento de agua residual con flujo subsuperficial presenta un alto grado de complejidad, de manera que su diagnóstico por medio de estudio de trazadores debe contemplar múltiples métodos de análisis. Los parámetros a utilizar son: método de Wolf-Resnick, índice de cortos circuitos, índice de morril y múltiples criterios de curva de tendencia.

##### **3.4.3.1 Evaluación hidráulica por método Wolf-Resnick**

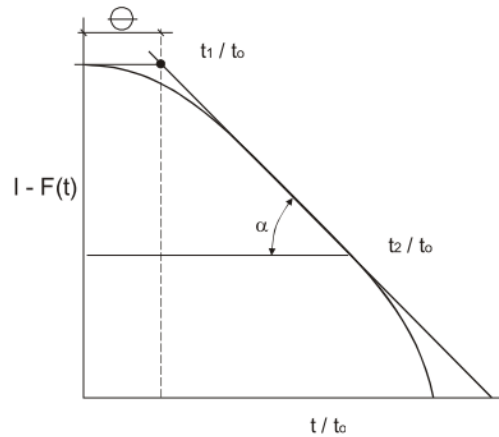
El método de Wolf-Resnick contemplado en la ecuación (13) representa el tipo de flujo en un reactor, teniendo en cuenta la presencia de zonas muertas.

$$[p(1 - m)] + [(1 - p)(1 - m)] + m = 1 \quad (13)$$

$$\text{Flujo de pistón} + \text{Flujo mezclado} + \text{espacios muertos} = 1$$

Por medio del análisis gráfico de la curva de trazador que permanece en el reactor ( $1-F(t)$ ) presentado en la figura 2 y la aplicación de las ecuaciones (14), (15) y (16) es posible determinar los porcentajes de flujo a pistón, zonas muertas y flujo mezclado.

**Figura 2. Curva  $1-F(t)$ , cantidad de trazador que permanece en el reator.**



Flujo a pistón

$$p = \frac{\theta \tan \alpha}{0,435 + \theta \tan \alpha} \quad (14)$$

Zonas muertas

$$m = 1 - \frac{\theta}{p} \quad (15)$$

Flujo mezclado

$$M = 1 - p \quad (16)$$

### 3.4.4 Indicadores complementarios en evaluaciones hidráulicas

#### 3.4.4.1 Índice de cortocircuitos (IC)

Es la relación entre la aparición del trazador y el tiempo teórico de retención. El índice de cortos circuitos determina la existencia de zonas de flujo preferencial y zonas muertas en el reactor. En un reactor a flujo pistón, el  $I_c$  es igual a 1. Si el valor se aproxima a 0, se deduce la presencia de mezcla, e indica la presencia de flujos preferenciales si es menor de 0,3 (Sabas, 2011).

$$I_c = \frac{T_i}{\tau} \quad (17)$$

Donde,

$T_i$ : es el tiempo en que aparece el trazador en el efluente.

$\tau$  = Tiempo de retención normalizado.

#### **3.4.4.2 Índice de morrill (IM)**

Es la relación para analizar la dispersión en un flujo no ideal a partir de un porcentaje acumulado de trazador en el tiempo:

$$IM = \frac{T_{90}}{T_{10}} \quad (18)$$

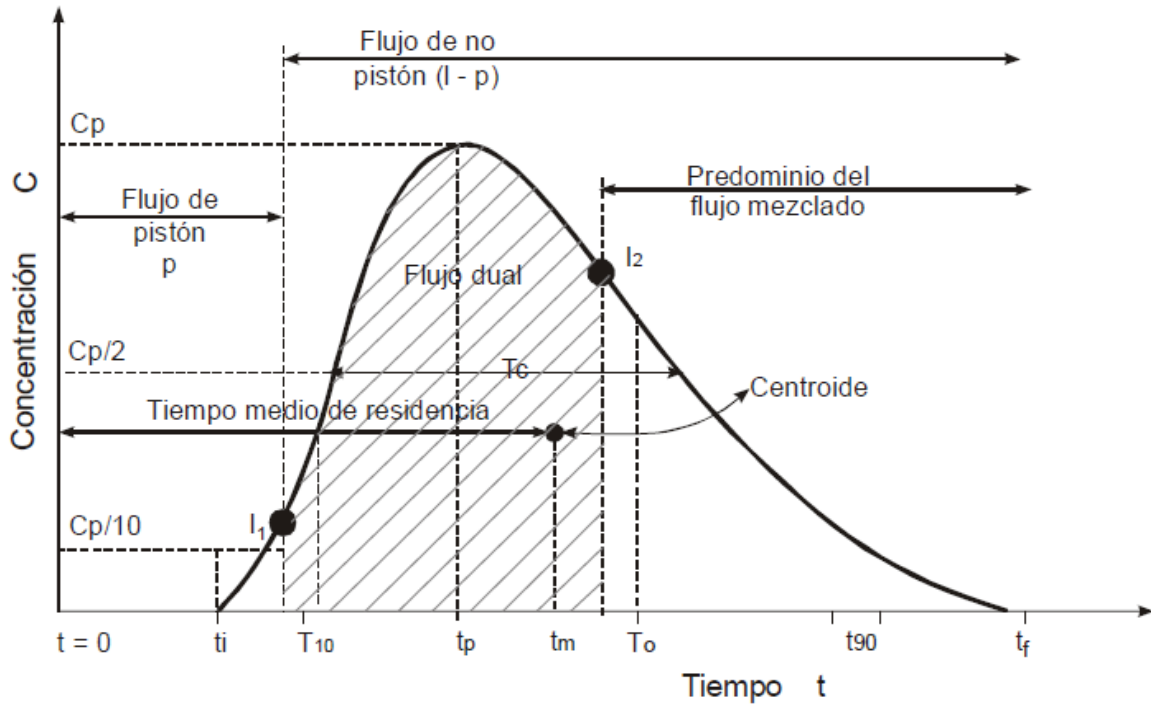
$T_{10}$ : tiempo en el que pasa el 10% de la masa del trazador.

$T_{90}$ : tiempo en el que pasa el 90% de la masa del trazador.

El índice de Morrill determina el tipo de flujo predominante en un reactor o sistema. Si todo el flujo es a pistón, se presenta una línea horizontal en la gráfica de porcentaje de trazador que pasa vs. tiempo, y el índice de Morrill es 1, pues todo el trazador sale en el tiempo  $t = t_0$ . En cambio, a medida que hay más proporción de flujo mezclado, se aumenta el ángulo que la curva hace con la horizontal, pues hay una distribución más amplia del tiempo de retención (Pérez *et al.*, 1992).

#### **3.4.4.3 Relaciones hidráulicas en curva de tendencia**

Los parámetros dimensionales presentes en la curva DTR como criterio determinante de cortos circuitos, zonas muertas y tipo de flujo son ampliamente utilizados en estudios de trazador, debido a la confiabilidad de los modelos propuestos y a la practicidad del método. Los diversos parámetros ilustrados en la Figura 3 permiten evaluar la presencia de cortocircuitos, zonas muertas y el tipo de flujo predominante en el sistema por medio de relaciones hidráulicas (tabla 7).



**Figura 3. Parámetros en curva DTR. Fuente: Manual III, CEPIS.**

$t_i$  = tiempo inicial desde que se aplica el trazador hasta que aparece en el efluente.

$\Delta t$  = tiempo que tarda en aplicar el reactor.

$t_{10}$  = tiempo correspondiente al paso del 10% de la cantidad total del trazador.

$t_p$  = tiempo modal, correspondiente a la presentación de la máxima concentración.

$t_m$  = tiempo mediano, correspondiente al paso del 50% de la cantidad del trazador.

$t_0$  = tiempo medio de retención o tiempo teórico de retención =  $V/Q$ .

$t_{90}$  = tiempo correspondiente al paso del 90% de la cantidad total del trazador.

$t_f$  = tiempo que transcurre hasta que atraviesa la totalidad del trazador al reactor.

$C_0$  = concentración inicial.

$C_p$  = concentración máxima a la salida.

**Tabla 7. Criterios de análisis por curva de tendencia.**

<b>Criterio</b>	<b>Consecuencia</b>
$t_i/t_o$ (19)	1 Flujo a pistón 0 Flujo mezclado 0,3< Presencia de cortos circuitos
$t_m/t_o$ (20)	< 1 Cortos circuitos > 1 Zonas muertas
$t_p/t_o$ (21)	1 Flujo a pistón 0 Flujo mezclado si $t_i/t_o < 0,5$ tiende a Flujo mezclado si $t_i/t_o > 0,5$ tiende a Flujo a pistón
$t_c/t_o$ (22)	$\approx 0,7$ Flujo mezclado = $\Delta t/t$ Flujo ideal estable
$t_b/t_o$ (23)	$\approx 2,3$ Flujo mezclado = $\Delta t/t$ Flujo ideal estable
$e = \frac{(t_f - t_p)(t_p - t_i)}{t_o}$ (24)	0 Flujo a pistón >2,3 Flujo mezclado

Fuente: Manual III, CEPIS.

#### **3.4.4.4 Eficiencia hidráulica ( $\lambda$ )**

La cuantificación de la eficiencia hidráulica fue realizada mediante la utilización de dos métodos: Tackston y Persson. Tackston establece la posición relativa del centroide en la curva DTR como indicador del tiempo de residencia medio. Así, la eficiencia hidráulica por este método corresponde al cociente entre el TRH real y el TRH teórico (ecuación 26). Por otro lado, Persson prioriza en evaluar la utilización del volumen efectivo y la forma de la curva demarcada por el trazador, lo cual se estima mediante la relación entre el tiempo de máxima concentración y el TRH teórico (Sabas, 2011; García, 2004).

$$\lambda_p = \frac{T_p}{t_o} \quad (25)$$

$$\lambda_T = \frac{TRH_{real}}{t_o} \quad (26)$$

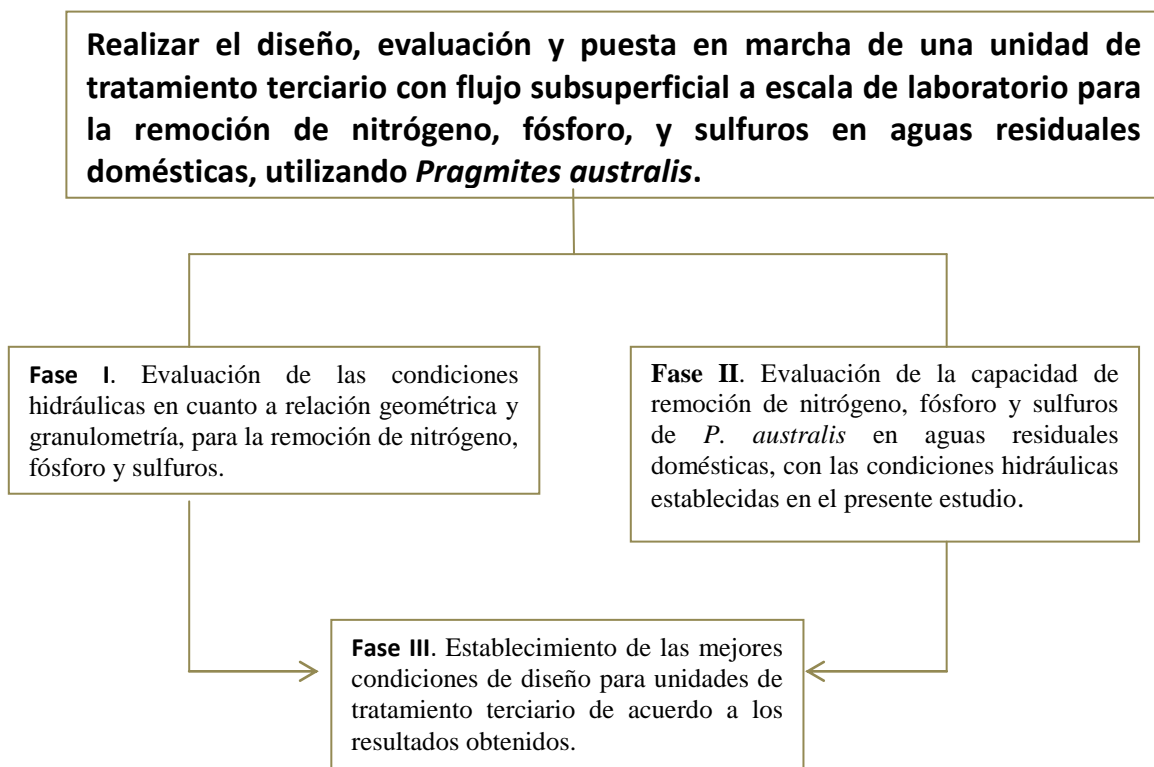
## 4 METODOLOGÍA

El presente estudio se desarrolló en tres fases, en las cuales se evaluaron conceptos de tratamiento terciario de aguas residuales domésticas a nivel de ingeniería ambiental y conceptos de aplicación de técnicas de biorremediación como la fitorremediación. El resumen de cada fase se presenta en el esquema 1.

**Fase I.** Evaluación de las condiciones hidráulicas en cuanto a relación geométrica y material filtrante, para la remoción de nitrógeno, fósforo y sulfuros.

**Fase II.** Evaluación de la capacidad de remoción de nitrógeno, fósforo y sulfuros de *P. australis* en aguas residuales domésticas, con las condiciones establecidas en el presente estudio.

**Fase III.** Establecimiento de las mejores condiciones de diseño para unidades de tratamiento terciario de acuerdo a los resultados obtenidos.



**Esquema 1. Metodología propuesta para el diseño de un sistema de tratamiento terciario para aguas residuales domésticas usando *P. australis*. Fuente: Autores.**

#### 4.1 Diseño experimental

El diseño experimental propuesto para el análisis de las variables que ejercen influencia sobre el desarrollo del proyecto se basó en tres reactores a escala laboratorio. Cada reactor contó con parámetros constantes y variables, de los cuales se evaluaron la relación geométrica y el medio filtrante del reactor con el fin de realizar un análisis comparativo de los resultados, ver Tabla 8.

**Tabla 8. Parámetros de los reactores en planta piloto.**

PARAMETROS	
<b>Factores</b>	Relación Geométrica (L:A)
	Medio Filtrante (sustrato)
<b>Constantes</b>	Vegetación
	Condiciones ambientales
	Trazador
	Régimen de flujo
	Concentraciones de entrada de solución N, P y sulfuros
<b>Respuesta</b>	Distribución Tiempo de Retención Hidráulica (DTR)
	Porcentaje de remoción de N, P y sulfuros

Fuente: Autores.

Para el diseño y construcción de los reactores, las variables evaluadas fueron la geometría y el medio filtrante, debido a que inciden en el desempeño hidrodinámico y afectan la localización y abundancia de zonas muertas y de flujos preferenciales. El cumplimiento de la relación geométrica deseada se aseguró por medio de la configuración de los baffles (Persson *et al.*, 1999; García *et al.*, 2004; Wörman *et al.*, 2005).

El caudal de agua residual doméstica se distribuyó uniformemente en el volumen útil de cada reactor, mediante la implementación de pantallas deflectoras (láminas



perforadas) en acero *Cold-Rolled* calibre 20 ubicados antes y después del sustrato, para garantizar flujo laminar a través del reactor. Estas láminas estaban ubicadas a 5 cm del afluente y del efluente. El medio filtrante y la relación geométrica fueron seleccionados para asegurar un comportamiento hidráulico aproximado a un modelo ideal de flujo a pistón (Sabas, 2011; Vymazal, 2008).

En el diseño se empleó un Factorial Completo  $2^k$ , realizado con el fin de identificar el dominio de los experimentos y establecer la optimización posterior, con base en los resultados esperados. En la tabla 9 se presentan los factores y niveles para el análisis del comportamiento hidráulico del presente estudio.

Basado en las variables seleccionadas, el diseño experimental de los reactores consistió en el estudio de cada factor a dos niveles, con combinaciones de todos los niveles entre factores. La matriz comprende  $2^k$  filas ( $2 \times 2 \times \dots \times 2 = 2^k$  experimentos) y  $k$  columnas.

**Tabla 9. Diseño experimental de los reactores.**

Reactores	Relación Geométrica	Medio Filtrante
1	1:4	Arena
2	4:1	Arena
3	1:4	Grava
4	4:1	Grava
<b>5 – Control</b>	1:4	Sin medio filtrante
<b>6 – Control</b>	4:1	Sin medio filtrante

Fuente: Autores.

La relación geométrica y el medio filtrante fueron contemplados en la determinación teórica del tiempo de retención hidráulico. El diseño de los experimentos permitió evaluar la eficiencia de remoción de nitrógeno y fósforo por comparación entre reactores. La experimentación se llevó a cabo usando 3 reactores con configuración 4:1, y 3 reactores con configuración 1:4.

En cada reactor se ubicaron 3 plantas de *P. australis*, con características de crecimiento homogéneas; el caudal a tratar correspondió a agua residual doméstica proveniente de una pequeña comunidad urbana. Con el fin de disminuir

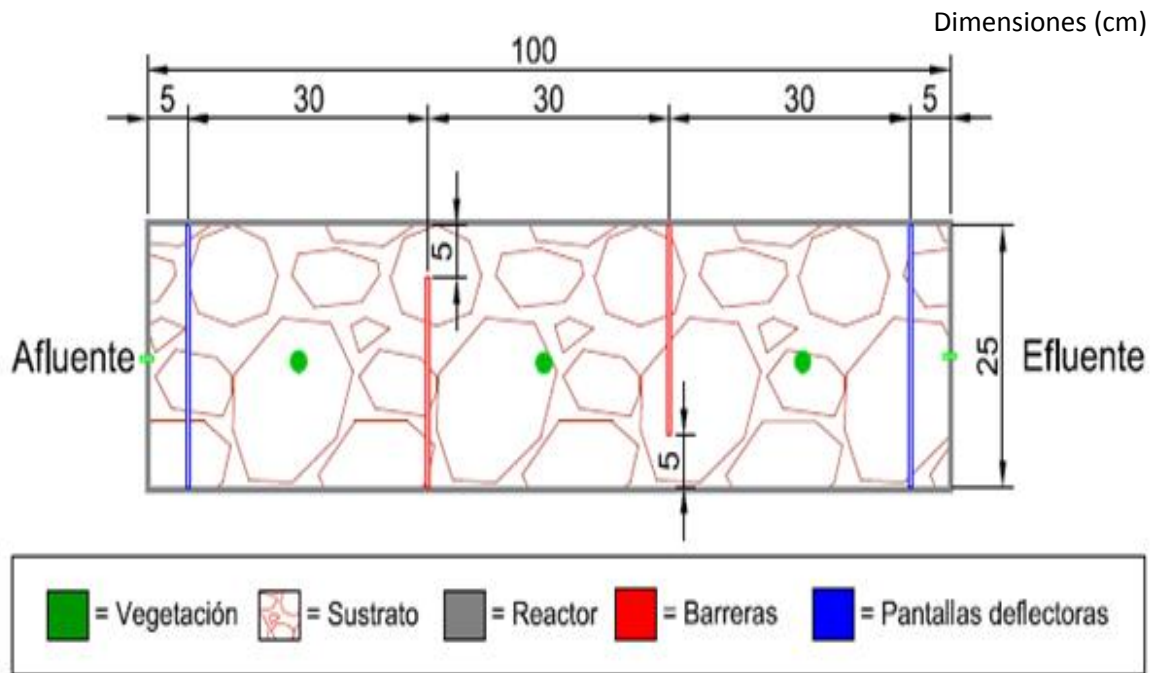
el sesgo de investigación, las plantas seleccionadas para todos los reactores tenían las mismas condiciones en cuanto a color, tamaño y longitud de la raíz. De igual manera, se llevó a cabo un proceso de homogenización sobre cada medio filtrante utilizado.

Como medio filtrante (sustrato) para el crecimiento de *P. australis*, se empleó grava en dos de los reactores, para aumentar la porosidad, retardar la colmatación del medio filtrante y favorecer actividades de mantenimiento y limpieza. En dos de los reactores se empleó arena, para incrementar la utilidad del sustrato como medio filtrante. En los controles, las plantas estaban en medio líquido, de características iguales a las de los otros reactores y en ausencia de sustrato.

La revisión bibliográfica realizada (Sabas, 2011; Persson, 1999) contribuyó al establecimiento de las dimensiones iniciales del diseño, cuya verificación y posterior optimización dieron como resultado el esquema ilustrado en las figuras 5, 6 y 7. Debido a que el área superficial es  $0,25 \text{ m}^2$  se sembraron 3 individuos de *P. australis* en cada reactor, aunque la cantidad recomendada para esa área es 1 individuo (Kalipci, 2011).

En la figura 5 se ilustran las dimensiones de diseño de los reactores en configuración 4:1, la ubicación de las pantallas deflectoras y de cada individuo de *P. australis*, y la distancia entre baffles para asegurar la distribución óptima del flujo. Las figuras 5, 6, 7 y 8 fueron elaboradas con el software AutoCAD 2012, y presentan el diseño de los reactores usando el Sistema Internacional de Medidas. Estos diseños se entregan adjuntos al proyecto.

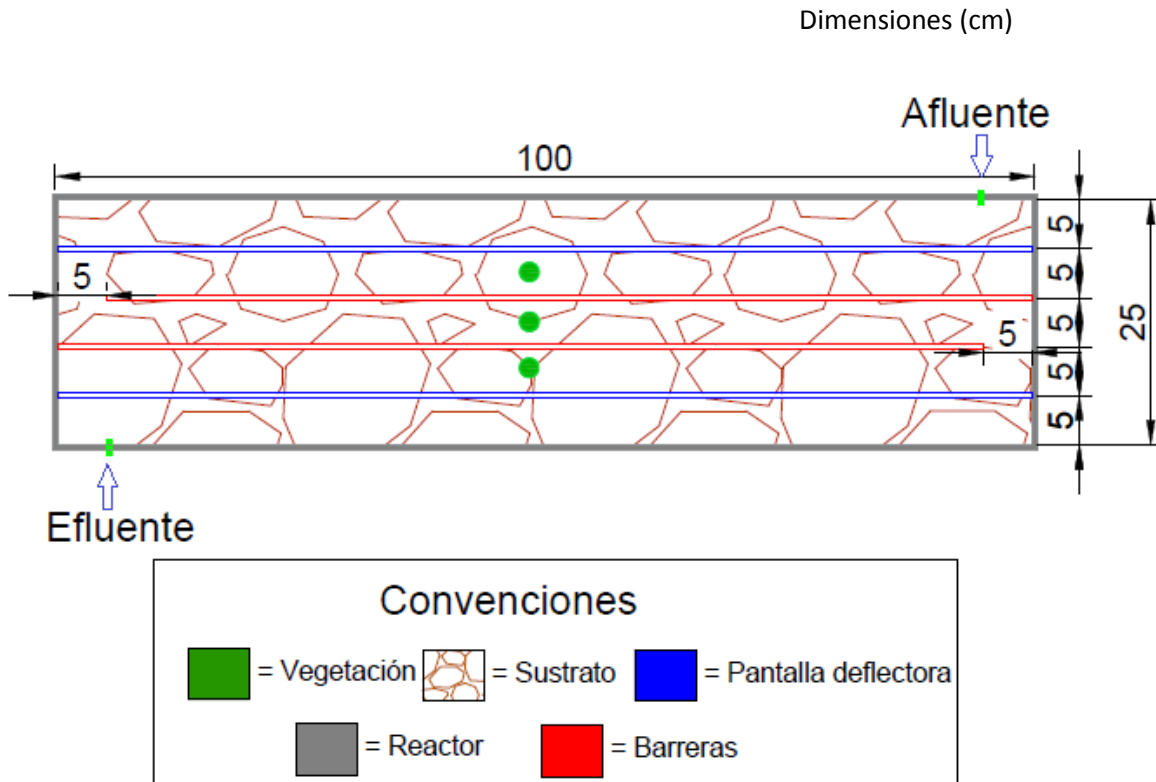
**Figura 4. Diseño del reactor a escala de laboratorio, vista superior de configuración 4:1.**



Fuente: Autores.

La figura 6 presenta los mismos parámetros mencionados en la figura 5, pero en configuración geométrica 1:4. La variación entre reactores consiste en el tamaño y ubicación de los baffles y pantallas deflectoras; no incide en el volumen útil del reactor, el medio filtrante ni el número de individuos de *P. australis* utilizados.

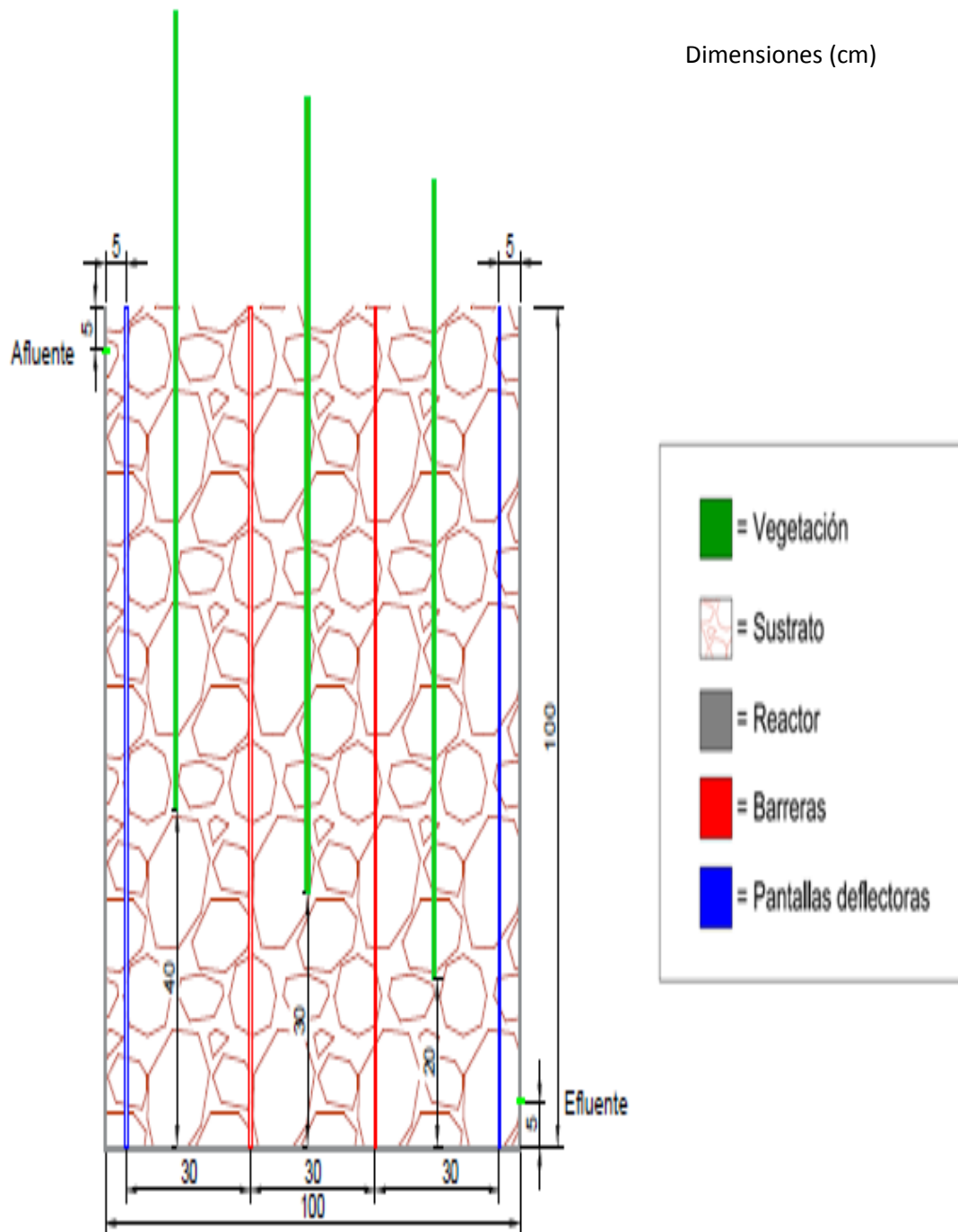
**Figura 5. Diseño del reactor a escala de laboratorio en vista superior de configuración 1:4.**



Fuente: Autores.

En las figuras 7 y 8 se presentan los esquemas en vista lateral de la ubicación de los individuos de *P. australis*. Alturas diferentes fueron consideradas en orden descendente, considerando la acción de la gravedad en la distribución del flujo. En la figura 7, se ilustra el reactor con configuración 4:1.

**Figura 6. Esquema de reactor a escala de laboratorio, en vista de perfil en configuración 4:1.**



Fuente: Autores.



Los reactores construidos a escala laboratorio en acero ColdRoll con configuraciones 1:4 y 4:1 para el tratamiento de agua residual doméstica se muestran en la figura 9.

**Figura 8. Vista superior de los reactores en configuración 1:4 y configuración 4:1 a escala de laboratorio.**



**Configuración 1:4**



**Configuración 4:1**

## 4.2 FASE I Evaluación de las condiciones hidráulicas en cuanto a relación geométrica y medio filtrante

### 4.2.1 Estimación de parámetros hidráulicos

Con el fin de estimar el tiempo de residencia del fluido en el reactor, se aplicaron criterios nominales tales como la estimación del Índice de Cortos Circuitos, Índice de Morril, tasa de recuperación del trazador y eficiencia hidráulica (Zataray, 2006). El procedimiento algebraico corresponde a estudios previos realizados por García (2004) y Sabas (2011). El trazador de cloruro de potasio fue seleccionado basado en el estudio de Mastrocicco (2011), para el tratamiento de aguas residuales domésticas utilizando en el sistema baffles.

Con el fin de determinar el comportamiento hidráulico dentro de cada uno de los reactores, se empleó una solución de Cloruro de Potasio (KCl) a concentración de 110 g/L (Mastrocicco, 2011). El pulso inicial fue de 20 mL y se monitoreó la conductividad en el efluente de cada uno de los reactores (ANEXO 1). Desde la inyección del trazador, se tomaron muestras en el efluente de cada reactor en intervalos de treinta minutos, durante el TRH teórico, es decir, 30 horas.

Los caudales deben ser definidos y controlados de acuerdo a la porosidad del medio filtrante ya que es necesario garantizar homogeneidad en el tiempo de retención hidráulico.

El análisis de recuperación de trazador se realiza con el fin de determinar indirectamente la presencia de zonas muertas, mediante la función  $F(t)$ , que es la fracción de la totalidad de trazador que ha salido, en unidades de concentración, como se muestra en la ecuación (25).

$$F(t) = \frac{\sum(C-C_o)x100}{\sum_m(C-C_o)} \quad (25)$$

Donde,

C: Concentración que permanece el reactor en el tiempo.

Co: Concentración aplicada en el tipo  $t=0$



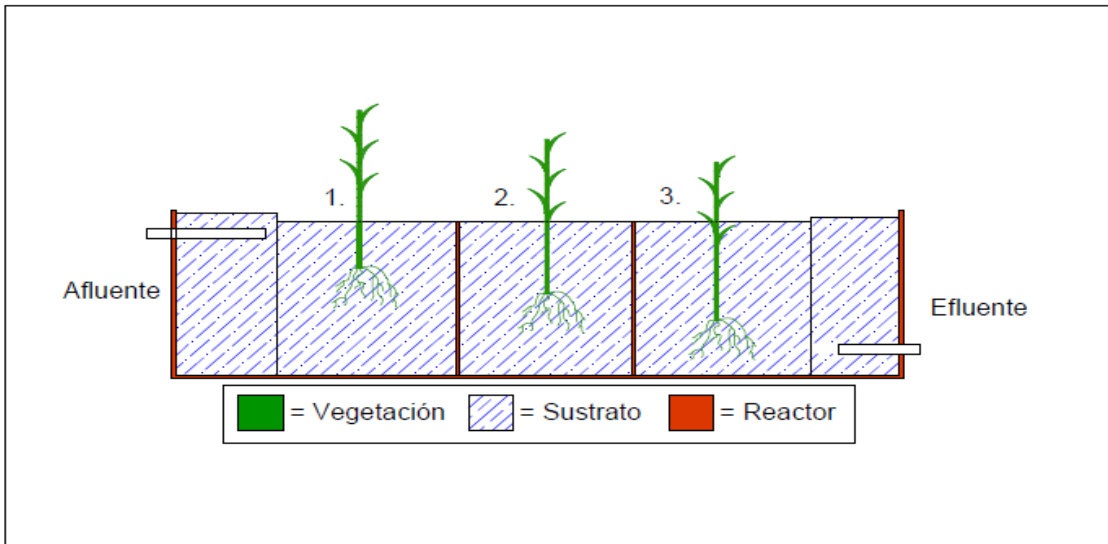
### **4.3 FASE II Evaluación de la capacidad de remoción de nitrógeno, fósforo y sulfuros de *P. australis* en aguas residuales domésticas, con las condiciones establecidas en el presente estudio**

#### **4.3.1 Adaptación de *P. australis* en aguas residuales domésticas**

La selección de la especie vegetativa *P. australis* como objeto de estudio se fundamentó en su capacidad para asimilar nutrientes (Vymazal, 2008; Gonzalias, 2007; Wathugala, 1987). La adaptación, crecimiento y reproducción de las plántulas de *P. australis* se realizó con agua residual doméstica durante un periodo de seis meses, con el fin de tener un stock representativo. Posteriormente, las plantas de *P. australis* fueron trasplantadas a los reactores, donde se implementó un sistema de flujo continuo con agua residual doméstica a concentraciones conocidas de nitrógeno, fósforo y sulfuros por un lapso de 4 días a manera de adaptación a las condiciones normales del sistema, previo a la ejecución de las pruebas de remoción. Los parámetros de análisis (ANEXO 2) del proceso de adaptación de las plantas fueron: la profundidad de la raíz de la planta, la evaluación del efecto clorosis, la elongación de la planta y la evaluación del número de hojas y nodos.

Los ejemplares de *P. australis* seleccionados para su uso en los reactores se ubicaron de forma escalonada dentro de los mismos, siendo 60 cm la profundidad del más cercano al efluente, 70 cm el siguiente, y 80 cm la del más cercano al efluente, como se ilustra en la figura 4.

**Figura 9. Esquema de reactores en vista de perfil, y localización de los individuos de *P. australis*.**



Fuente: Autores.

#### **4.3.2 Remoción de Nitrógeno, Fósforo y Sulfuros**

Para evaluar la concentración de nitrógeno se aplicaron análisis de nitrógeno total por el método SM 4500 NORG-D, en el afluente y efluente de cada reactor. La concentración de fósforo se determinó por fósforo total por digestión ácida con UV, usando el método SM 4500 P-B-E. La concentración de sulfuros se determinó usando el método S4500 S2-G. Los análisis químicos se realizaron en el Laboratorio de Análisis Químico de Aguas Residuales de la Universidad Pontificia Bolivariana-Seccional Bucaramanga, acreditado por el IDEAM.

Las muestras recolectadas se preservaron con 1 mL de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> [98%] para análisis de nitrógeno y fósforo, y con 5 gotas de NaOH [32%] para análisis de sulfuros, y se mantuvieron refrigeradas hasta su análisis en laboratorio. Los análisis de remoción se realizaron 5 veces en cada reactor, cada una de ellas durante 30 horas, con el fin de disminuir el rango de error.

#### 4.4 FASE III Establecimiento de las mejores condiciones de diseño para unidades de tratamiento terciario de acuerdo a los resultados obtenidos

Basados en los resultados obtenidos de la Fase I y II se establecieron las mejores condiciones de diseño para la unidad de tratamiento terciario con flujo subsuperficial por baffles.

Para la evaluación de la hidráulica del sistema diseñado, se realizó el análisis estadístico de los datos obtenidos en los experimentos con cada uno de los parámetros, usando las hipótesis presentadas en la tabla 10, aplicando un análisis de varianza (ANOVA) y una prueba de Scheffé y Dunnet, correspondientes a diseños estadísticos  $2^K$ , para comparar el comportamiento de los medios filtrantes y la configuración de los reactores.

**Tabla 10. Hipótesis estadísticas.**

Factor	Ho	Ha
<b>Material filtrante (arena, grava y sin material filtrante).</b>	No existe diferencia en las medias de desempeño hidráulico para diferentes materiales filtrantes. Arena=Grava=Sin M.F	El material filtrante afecta significativamente en el desempeño hidráulico. Arena≠Grava≠Sin M.F

Fuente: Autores.

Inicialmente se llevó a cabo la normalización de los datos obtenidos, con el fin de hacer comparables las curvas de distribución de tiempos de residencia, teniendo en cuenta que se encuentran bajo condiciones diferentes (Sabas, 2011) usando las siguientes ecuaciones:

$$E(\theta) = C_i/C_o \quad (26)$$

$$\theta = T_i/\tau \quad (27)$$

Dónde:

$C_i$ : Conductividad registrada del trazador en efluente al tiempo  $T_i$  ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )

$C_0$ : Conductividad inicial registrada en el efluente ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )

$T_i$ : Tiempo transcurrido después de haber inyectado el trazador

$\tau$ : TDH teórico

Las pruebas estadísticas aplicadas se emplean para corroborar los resultados del estudio de trazador en términos de similitud o diferencia entre los tratamientos a través del análisis de tendencia.

## 5 RESULTADOS Y ANÁLISIS

### 5.1 ANÁLISIS HIDRÁULICO

#### 5.1.1 Determinación del comportamiento hidráulico en la configuración 4:1

Para la determinación del comportamiento hidráulico de los reactores con configuración Largo:Ancho de 4:1, se llevó a cabo una prueba de trazador (ANEXOS 3 y 4), en la cual se usó un pulso de 20 mL de KCl a concentración de 110 g/L con caudales diferentes para cada tipo de medio filtrante regulados con una bomba peristáltica Masterflex 07519-25, según se reporta en la tabla 11.

**Tabla 11. Caudales en reactores de acuerdo al medio filtrante.**

Reactor	Caudal (mL/s)
Control	1.6
Grava	0.8
Arena	0.6

Fuente: Autores.

Los resultados de conductividad obtenidos se ilustran en la figura 11, y en la tabla 12 se presenta una síntesis de los criterios hidráulicos principales para la configuración 4:1 (ANEXO 5).

**Tabla 12. Parámetros hidráulicos principales en configuración 4:1.**

Criterio	Configuración 4:1		
	Grava	Arena	Control
TRH real (horas)	26.866	47.059	9.517
Índice de Morril	0.471	9.257	2.215
Eficiencia hidráulica (Tacktsen)	0.886	1.603	0.313
Eficiencia hidráulica (Persson)	0.693	2.692	0.230
% Trazador recuperado	62.621	82.000	30.307

Fuente: Autores

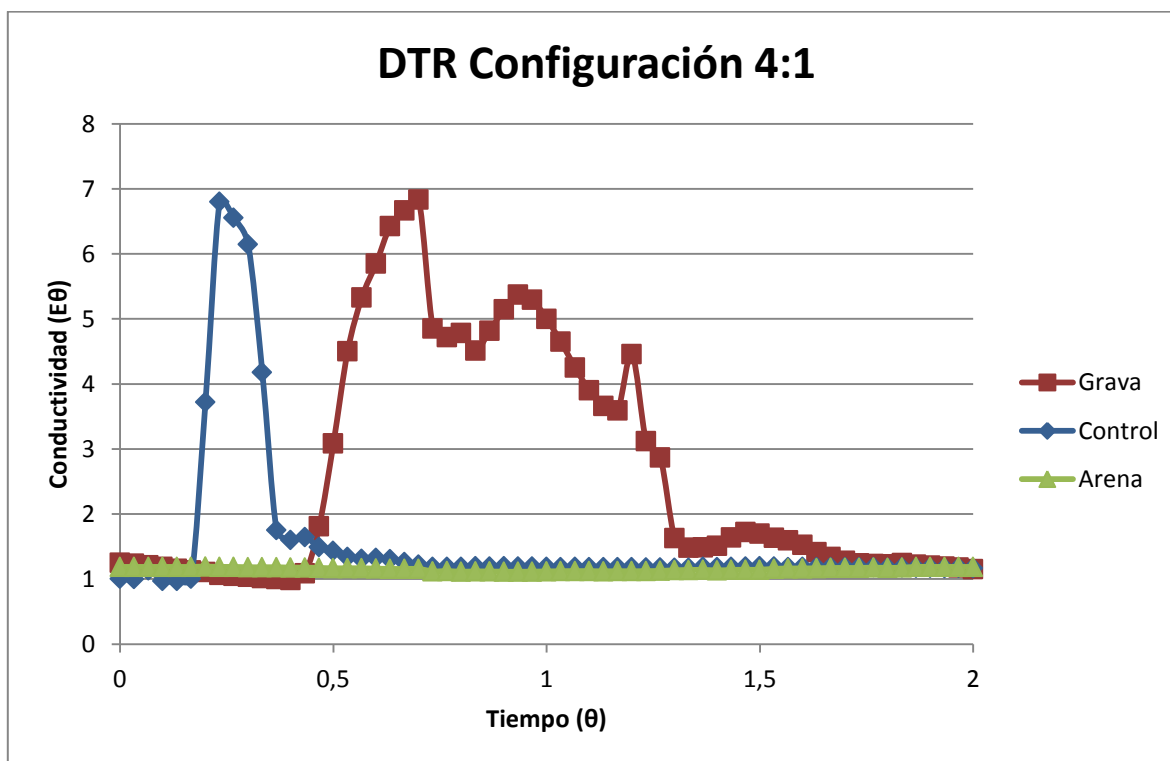
En la tabla 13 se presentan los criterios aplicados a las variables hidráulicas mediante el método de Wolf-Resnick, cuyas variables de entrada (ANEXO 6) fueron halladas mediante la tangente de la gráfica de porcentaje de trazador remanente (ANEXOS 7b, 8b y 9b).

**Tabla 13. Criterios obtenidos por método Wolf-Resnick en configuración 4:1.**

Criterio	Configuración 4:1		
	Grava	Arena	Control
<b>p (F. Pistón)</b>	0.594	0.000	0.681
<b>m (% Z. Muertas)</b>	0.158	-----	0.755
<b>M (% F. Mezclado)</b>	0.406	1.000	0.319

Fuente: Autores.

**Figura 10. Curvas DTR en configuración 4:1 para grava, control y arena.**



Fuente: Autores.

En el reactor control se aprecia una curva con tendencia a flujo pistón, lo cual es un resultado deseado, y coincide lo estimado matemáticamente con un porcentaje

del 68,1% (tabla 13). No obstante, la figura 10 indica que la salida del trazador se produce en el 20% del TRH teórico, lo cual puede deberse a la ausencia de medio filtrante, ya que ofrece mayor libertad de desplazamiento al flujo. Por tanto, la eficiencia hidráulica fluctúa en valores inferiores al 35% (23% por Persson y 31,3% por Tackston), y factores como la gran distancia entre placas y el bajo caudal pueden incidir en la creación de cortos circuitos (tabla 14) dentro del reactor, lo cual explica la disminución del tiempo de retención, en relación al teórico. El método de Wolf-Resnick indica que las zonas muertas superan el 70% y presentó el menor porcentaje de recuperación de trazador (30,3%) (ANEXO 8).

**Tabla 14. Criterios de análisis por curva de tendencia en configuración 4:1.**

Criterio	Variable	Reactores					
		Grava	Interpret.	Arena	Interpret.	Control	Interpret.
<b>Índice de Cortos Circuitos</b>	$t_c=t_i/t_o$	0.429	Normal	0.000	Corto Circuito	0.197	Corto Circuito
<b>Relación hidráulica 1</b>	$t_m/t_o$	0.855	Corto Circuito	1.634	Zonas Muertas	0.284	Corto Circuito
<b>Relación de Difusión</b>	$t_c/t_o$	0.346	N.A	1.346	N.A	0.115	N.A
<b>Relación hidráulica 2</b>	$t_b/t_o$	0.069	F. Estable Ideal	0.269	N.A	0.023	F. Estable Ideal
<b>Excentricidad de la curva</b>	$e$	0.825	F. Pistón	- 2.181	F. Pistón	0.527	F. Pistón

Fuente: Autores.

Los valores de conductividad en el efluente ilustrados por la curva de grava, indican que el tiempo de retención hidráulico real es similar al TRH teórico, con resultados de eficiencia hidráulica según Persson del 69,3% y 88,6% según Tackston (tabla 12); la curva presenta un comportamiento de flujo a pistón de 59,4%. En comparación, el reactor de grava es el mejor en configuración 4:1, ya que la curva presenta una distribución más uniforme en el tiempo (ANEXO 7), lo que demuestra la eficiencia de los baffles para definir el recorrido dentro del reactor, y del medio para incrementar el TRH real (en relación al teórico).

Los cálculos de índices complementarios realizados confirman dicha eficiencia con un porcentaje de zonas muertas de 15,8 (inferior a los resultados de los otros reactores). No obstante, los picos en la curva ilustran la existencia de flujos preferenciales dentro del reactor de grava, lo cual puede deberse a la amplia distancia entre las placas y al bajo caudal; los valores registrados en la tabla 14 permiten concluir que los cortos circuitos no son significativos.

La curva obtenida según los datos del reactor con arena indica que en el efluente no se registró incremento alguno de conductividad (ANEXO 9). Lo anterior se explica teniendo en cuenta las características físicas del medio y el caudal. Al tener tan baja porosidad, el medio cumple su función de incrementar el TRH dentro del reactor, presentando así un TRH real 1,5 veces el TRH teórico. El inconveniente surge al tener un caudal tan pequeño, ya que en lugar de avanzar continuamente, el flujo tiene tiempo de descender hasta el fondo del reactor a manera de zonas muertas que acumulan el trazador. El reactor presenta un comportamiento de mezcla completa en un 100%; no obstante, este resultado, así como las zonas muertas, cortos circuitos y la mayoría de índices hidráulicos no aplican (tabla 13 y 14), indicando un comportamiento mixto no ideal indeseable para este tipo de sistemas. Por tanto, se concluye que el trazador no incrementó la conductividad del efluente debido a que se precipitó en el fondo del reactor.

Los reactores con configuración 4:1 no tienen un comportamiento hidráulico aceptable. La presencia de zonas muertas y flujos preferenciales puede corregirse incrementando el caudal, lo cual disminuirá el TRH. Por tanto, una corrección pertinente a la configuración es el incremento de baffles, con la consecuente disminución de distancia entre ellos, sin afectar el TRH.

### **5.1.2 Determinación del comportamiento hidráulico en la configuración 1:4**

Para la determinación del comportamiento hidráulico de los reactores en configuración geométrica 1:4 se utilizó un pulso de 50 mL de KCl como trazador, a concentración de 110 g/L. La conductividad en el efluente se evaluó cada 30 minutos durante el TRH de 30 horas, por triplicado.



Los resultados de conductividad obtenidos se ilustran en la figura 11, y en la tabla 15 se presenta una síntesis de los principales criterios hidráulicos obtenidos para la configuración 1:4 (ANEXO 10).

**Tabla 15. Parámetros hidráulicos principales en configuración 1:4.**

Criterio	Configuración 1:4		
	Grava	Arena	Control
<b>TRH real (horas)</b>	20.125	18.344	19.553
<b>Índice de Morril</b>	4.571	4.306	2.991
<b>Eficiencia hidráulica (Tackson)</b>	0.664	0.625	0.644
<b>Eficiencia hidráulica (Persson)</b>	0.398	0.436	1.151
<b>% Trazador recuperado</b>	53.641	61.413	46.497

Fuente: Autores.

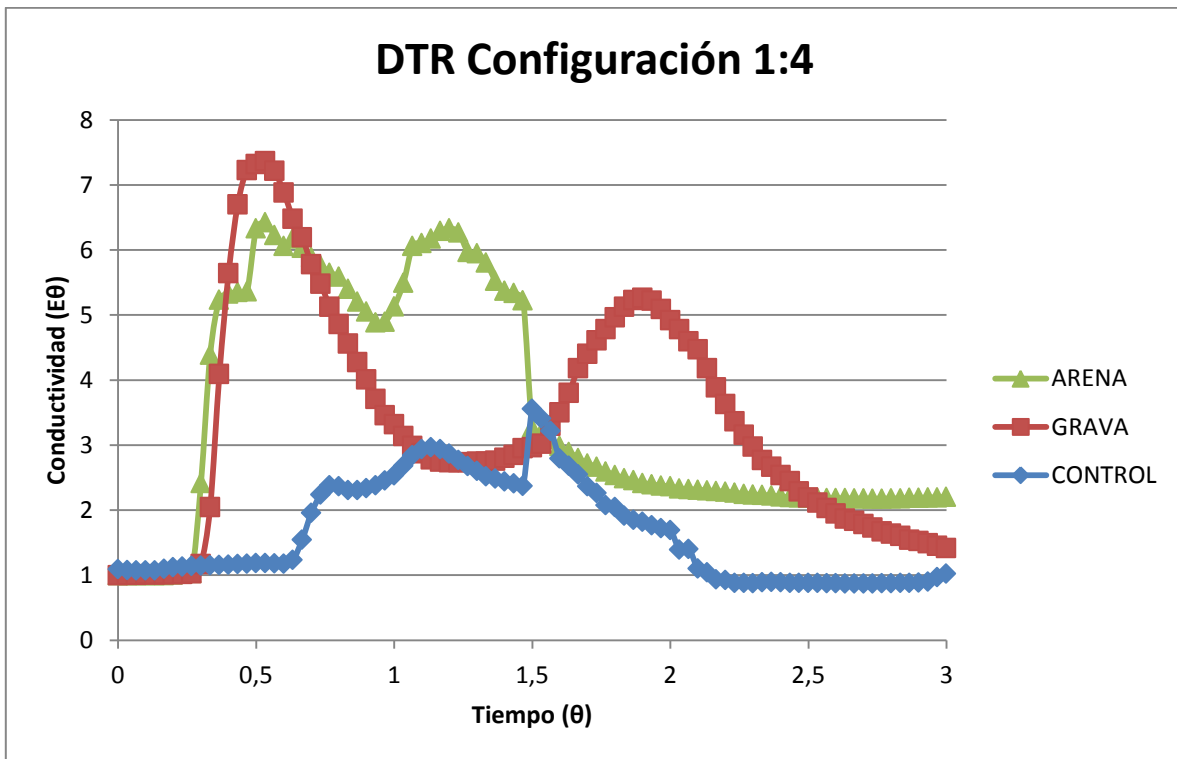
En la tabla 16 se presentan los criterios aplicados a las variables hidráulicas mediante el método de Wolf-Resnick, cuyas variables de entrada (ANEXO 6) fueron halladas mediante la tangente de la gráfica de porcentaje de trazador remanente (ANEXOS 11b, 12b y 13b).

**Tabla 16. Criterios obtenidos por método Wolf-Resnick en configuración 1:4.**

Criterio	Configuración 1:4		
	Grava	Arena	Control
<b>p (F. Pistón)</b>	0.295	0.215	0.639
<b>m (% Z. Muertas)</b>	0.343	0.301	0.435
<b>M (% F. Mezclado)</b>	0.705	0.785	0.361

Fuente: Autores.

Figura 11. Curvas DTR en configuración 1:4 para grava, control y arena.



Fuente: Autores.

Los registros obtenidos en el efluente del reactor control permiten corroborar los resultados de TRH experimental (20,125h), pues el centroide de la curva se aproxima al tiempo de retención hidráulico teórico (30,4h). Por otro lado, la curva presenta múltiples fluctuaciones (figura 11), lo que podría indicar diversas líneas de preferencia generadas por fugas en las barreras o zonas muertas. Los resultados de los parámetros hidráulicos utilizados son herramientas vitales para ratificación de dichos planteamientos. En este caso, los criterios utilizados indican un porcentaje significativo de zonas muertas equivalente al 43,5% por el método de Wolf y Resnick; análogamente, las relaciones de curva de tendencia junto con el índice de cortos circuitos (tabla 17) evidencian la presencia de flujos preferenciales (ratificación de la gráfica). Sin embargo, la eficiencia hidráulica estimada por los métodos de Tackston y Persson, 64,4% y 115,1% respectivamente, sugieren un comportamiento aceptable (tabla 15); Persson supera el 100% matemáticamente a causa de que el centroide de la gráfica

presenta desplazamiento hacia la derecha. El comportamiento del reactor es de flujo a pistón con un porcentaje de 63,9% (tabla 16).

**Tabla 17. Criterios de análisis por curva de tendencia en configuración 1:4.**

Criterio	Variable	Reactores					
		<i>Grava</i>	<i>Interpret.</i>	<i>Arena</i>	<i>Interpret.</i>	<i>Control</i>	<i>Interpret.</i>
<b>Índice de Cortos Circuitos</b>	$l_c=ti/to$	0.132	Corto Circuito	0.119	Corto Circuito	0.082	Corto Circuito
<b>Relación hidráulica 1</b>	$t_m/to$	0.652	Corto Circuito	0.570	Corto Circuito	0.637	Corto Circuito
<b>Relación de Difusión</b>	$t_c/to$	0.136	N.A	0.370	N.A	0.370	N.A
<b>Relación hidráulica 2</b>	$t_b/to$	0.026	F. Estable Ideal	0.027	F. Estable Ideal	0.074	F. Estable Ideal
<b>Excentricidad de la curva</b>	$e$	2.639	F. Mezclado Ideal	1.056	F. Pistón	0.033	F. Pistón

Fuente: Autores.

La distribución de los tiempos de residencia (DTR) plasmada en la curva del reactor con grava sugiere la existencia de dos rutas de flujo y un predominio de flujo mezclado con un 70,5% (tabla 16), lo cual tiene concordancia con el análisis de la curva de tendencia presente en la tabla 17. Dado que las campanas difieren en su cota máxima, la de mayor concentración puede ser causada por fallas hidráulicas en términos de cortos circuitos, pues la pendiente inicial es bastante pronunciada y presenta desplazamiento significativo a la izquierda. La verificación numérica de dichos fenómenos corresponde a los modelos propuestos, donde las zonas muertas tienen un porcentaje del 34,3% (tabla 16), hay presencia de cortos circuitos y la eficiencia hidráulica es del 66,4% de acuerdo a Tackston y 39,8% con Persson (tabla 15); la diferencia entre los dos métodos de eficiencia hidráulica corresponden a que la cota máxima de concentración se encuentra en el 20% del tiempo (ANEXO 11); por otro lado, la curva subsiguiente comprende un TRH de mayor viabilidad técnica y aceptación numérica (con tendencia al TRH teórico).

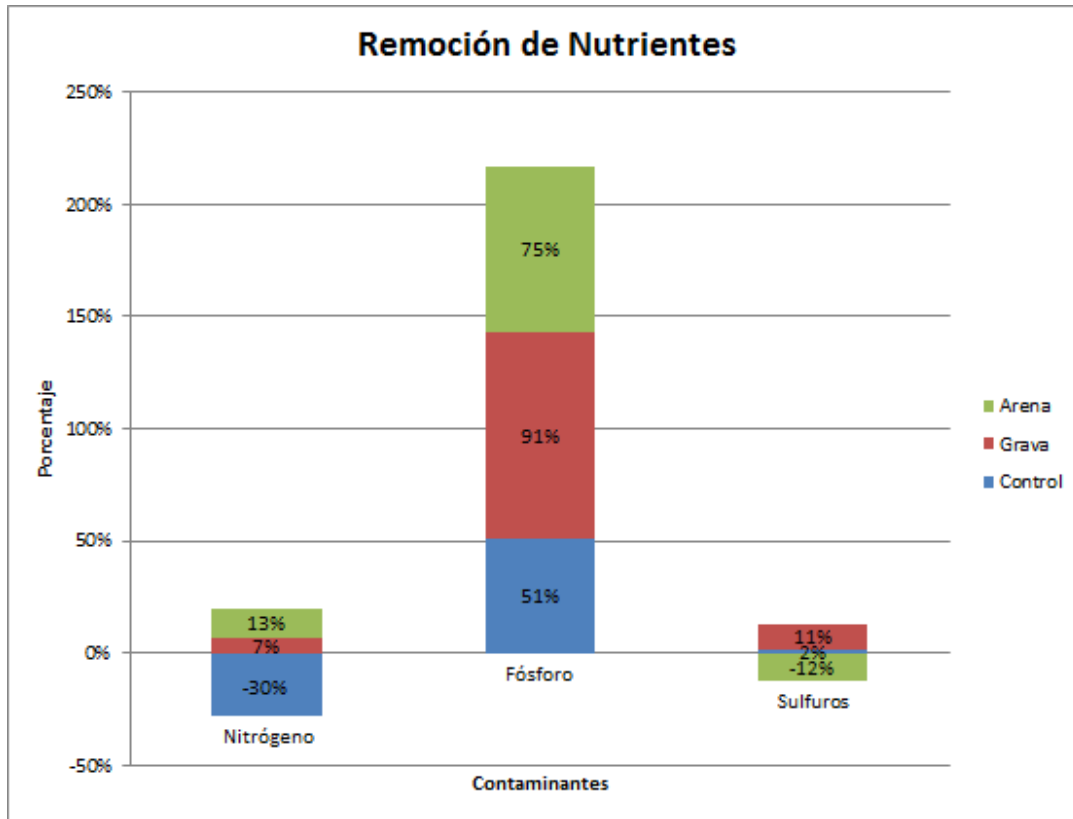
La detección inicial del trazador en el reactor con arena es bastante acelerado en relación con el reactor control, sin embargo, éste presenta un comportamiento parcialmente constante excepto por un tenue pico de descenso, lo que posiblemente señala la presencia de una línea alterna de flujo. Una vez finalizada la segunda campana, la curva pierde su tendencia gradual, decreciendo súbitamente de manera que soporta la teoría expuesta sobre línea de flujo alterna. Las estimaciones hidráulicas realizadas indican eficiencia hidráulica entre el 43,6% y el 62,5% (Persson y Tackston respectivamente), un porcentaje de zonas muertas del 30,1% y un comportamiento de 78,5% con tendencia a flujo mezclado y 21,5% de flujo a pistón (tabla 16). La cola final prolongada de la curva en cuestión muestra una concentración que supera a la inicial, pero a un porcentaje de recuperación del trazador del 61,4% (ANEXO 13).

## **5.2 ANÁLISIS DE REMOCIÓN DE NITRÓGENO, FÓSFORO Y SULFUROS**

### **5.2.1 Remoción de contaminantes en configuración 4:1**

El análisis se efectuó teniendo en cuenta la eficiencia de absorción de nutrientes (nitrógeno, fósforo y sulfuros) por parte *P. australis*. Los resultados obtenidos (ANEXO 14) para los reactores control, grava y arena en la configuración geométrica 4:1 se ilustran en la figura 12.

**Figura 12. Promedio de resultados de remoción de N, P y S en configuración 4:1.**



Fuente: Autores.

En el reactor control se presentó la menor remoción de todos los contaminantes analizados, en relación al comportamiento presentado en los otros reactores, lo cual se explica por la ausencia de sustrato, que a su vez dificulta la eficiencia de remoción de la rizosfera e impide el tratamiento del agua residual mediante procesos fisicoquímicos. El nitrógeno fue el compuesto con menores porcentajes de remoción en todos los reactores, lo cual puede deberse a que la materia orgánica proveniente de microorganismos y hojas muertas representa un aporte adicional de nitrógeno dentro de cada reactor (Santoyo *et al.*, 2007).

En el reactor con sustrato de grava se remueve la mayor concentración de fósforo y sulfuros, en comparación a los otros reactores. El análisis de las condiciones hidráulicas indica que el tipo de material favorece la dispersión uniforme del flujo

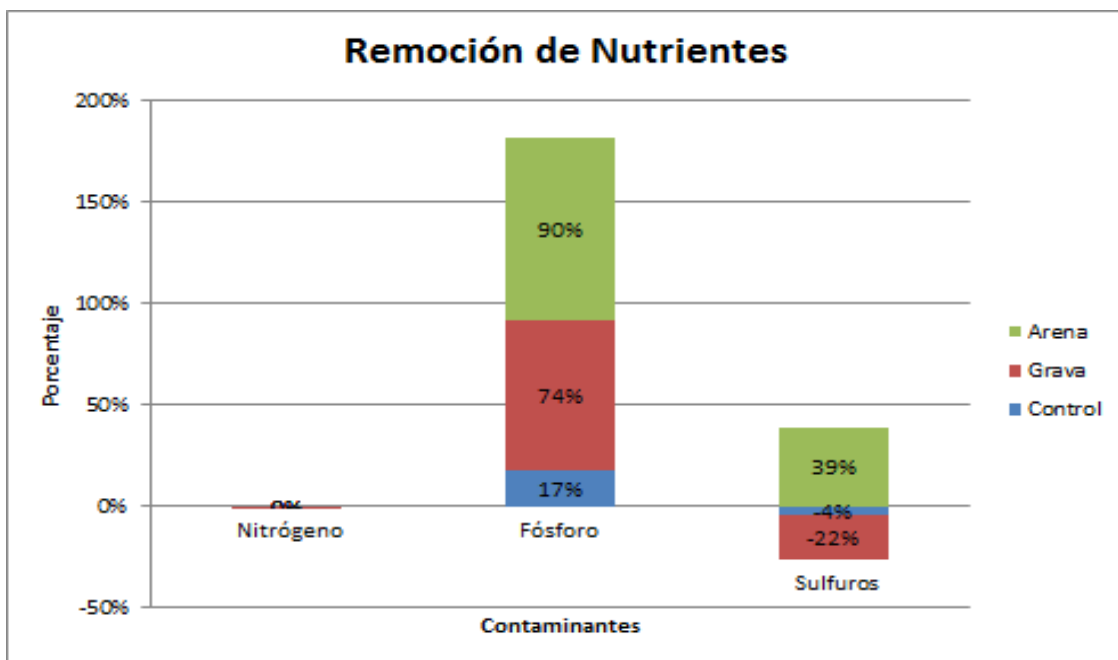
en el TRH calculado, y permite el crecimiento constante de las raíces debido a las condiciones favorables de porosidad.

El reactor con arena presenta mayor disminución de nitrógeno en comparación a los otros reactores, y una remoción considerable de fósforo. No obstante, la remoción de sulfuros es negativa, lo cual indica que el valor se incrementó dentro del reactor, presumiblemente debido a la acción reductora de bacterias en condiciones anaerobias (y, mediante el catalizador *Thiobacillus*, en zonas aerobias), las cuales reducen las formas presentes de sulfato a sulfuro y, posteriormente, a formas de sulfuro con valencia mayor a -2 (Gonzalías, 2007).

### 5.2.2 Remoción de contaminantes en configuración 1:4

El análisis se llevó a cabo asegurando igualdad de condiciones en los reactores de grava, arena y control en configuración 1:4, con el fin de evidenciar la influencia del material filtrante en las dinámicas de remoción. Los resultados obtenidos en los reactores control, grava y arena en configuración 1:4 se muestran en la figura 13.

**Figura 13. Promedio de resultados de remoción de N, P y S en configuración 1:4.**



Fuente: Autores.

Los resultados indican que no hubo remoción de nitrógeno total en ninguno de los reactores, lo cual se relaciona con las fluctuaciones normales de la composición del ARD utilizada, y la generación de materia orgánica en los reactores (detritos), debido a que condicionan el medio para que haya abundancia de nitrógeno, de modo que retrasan resultados efectivos de remoción. También es posible que la disminución del compuesto no pueda evidenciarse debido a que se realiza en concentraciones muy bajas y el equipo de medición no las detecta.

El reactor control en configuración 1:4 presentó la eficiencia más baja de todos los reactores, lo cual ratifica la influencia directa y positiva del uso de material filtrante. No obstante, se esperaba un mayor grado de disminución de contaminantes en el efluente de los reactores de grava, arena y control en configuración 1:4, ya que los resultados obtenidos acerca de las características de la distribución del flujo indicaban su mayor eficiencia hidráulica.

Los porcentajes de remoción de fósforo y sulfuros fueron mayores en reactor de arena en la configuración 1:4 que en la configuración 4:1. Por el contrario, en el reactor de grava se registró una disminución del porcentaje de remoción de fósforo y sulfuros, lo cual se atribuye a que el área superficial del sustrato favorece el desarrollo de biofilm, el cual incrementa la concentración de fósforo dentro del reactor (Santoyo *et al.*, 2007).

La disminución en el porcentaje de remoción de sulfuros, en comparación con la configuración 4:1, puede explicarse mediante el análisis del incremento de la rizosfera en los individuos de *P. australis*, ya que la acción metabólica de los microorganismos reductores de azufre, incrementa la cantidad de sulfuros presentes en el efluente mediante la transformación de otras formas de azufre presentes en el ARD (Gonzalías, 2007).

### **5.2.3 Comparación de porcentajes de remoción con la literatura**

Los valores obtenidos en las pruebas se promediaron con el fin de establecer el porcentaje de remoción, y hacerlo comparable a los resultados encontrados en la bibliografía (Santoyo *et al.*, 2007; Wathugala, 1987; Lee, 2009).

Los porcentajes de remoción encontrados en la literatura presentan grandes variaciones entre sí, debido a las fluctuaciones de clima, valores iniciales de los contaminantes, duración de la experimentación, cantidad de individuos de *P. australis* por m<sup>2</sup>, y eficiencia hidráulica de los sistemas diseñados. Por tanto, una comparación numérica no es representativa en términos de eficiencia del sistema propuesto, aunque permite establecer las generalidades del sistema en relación a otros bajo condiciones similares. En la tabla 18 se presentan los valores tomados como referencia de la literatura.

**Tabla 18. Revisión de porcentajes de remoción de nutrientes encontrados en la literatura.**

	<b>N Total</b>	<b>Fósforo</b>	<b>Sulfuros</b>
<b>Santoyo et al., 2007</b>	19.20%	6%	---
<b>Wathugala, 1987</b>	88.00%	99.00%	---
<b>Lee, 2009</b>	45.00%	55.00%	---
<b>Gonzalías, 2007</b>	---	---	≈30.00%

Fuente: Autores.

Al comparar los porcentajes de remoción de nitrógeno total, se evidencia que todos los obtenidos difieren en gran magnitud de los reportados en la literatura, siendo el del reactor de arena (13%) el más parecido a Santoyo *et al.* (2007). Todos los valores fueron mucho menores a los reportados en Wathugala (1987) y Lee (2009). Lo anterior se debe a que, si bien las variaciones ambientales son despreciables, la duración de la experimentación es menor a la presentada en la literatura.

En el caso de fósforo, los porcentajes de remoción obtenidos en los reactores de control y grava se asemejan a los presentados en Lee y Wathugala, respectivamente. El reactor con arena presenta un valor intermedio entre estos.

Para el análisis comparativo del porcentaje de remoción de sulfuros reportado por Gonzalías (2007) se tiene que los resultados obtenidos son cercanos a ese valor. Entonces, la remoción en configuración 1:4 con el reactor de arena es mayor que la reportada en la literatura.



El reactor de grava en configuración 4:1 tuvo los mejores porcentajes de remoción, lo cual se encuentra relacionado con su alta eficiencia hidráulica (pocas zonas muertas y bajos índices de cortos circuitos). Las características fisicoquímicas del material lo hacen idóneo para su utilización en humedales construidos.

### 5.3 ANÁLISIS DE CRECIMIENTO VEGETAL

En el desarrollo de la experimentación se tuvo en cuenta la observación de los cambios en el crecimiento de los individuos de *P. australis* seleccionados (figura 14). Con el fin de llevar a cabo una comparación rigurosa se determinó el número de hojas, número de nodos, longitud de la raíz y del tallo de cada individuo, y se comparó la medición inicial con la obtenida después de 2 semanas.

**Figura 14. Individuos de *P. australis* seleccionados**



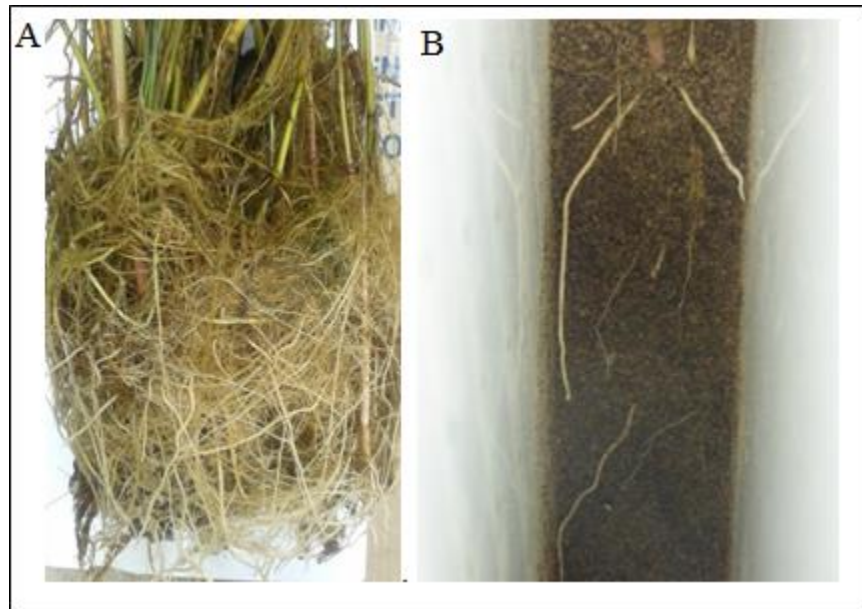
Fuente: Autores.

En cada uno de los reactores se ubicaron 3 ejemplares de *P. australis*, distribuidos equitativamente, uno por cada compartimento, siendo el *Número 1* el más cercano al afluente, el *Número 2* el del centro y el *Numero 3* el más cercano al efluente, según se ilustró en la figura 4.

Los criterios utilizados para el análisis de la vegetación, permiten determinar la eficiencia de absorción de contaminantes por parte de los individuos de *P. australis*. El desarrollo radicular es el principal indicador del metabolismo de las plantas y los microorganismos.

El desarrollo radicular puede mantenerse estable o incrementarse, de acuerdo a las condiciones del medio. En la figura 15 (A) se aprecia el desarrollo masivo de la rizosfera en el reactor control, con el fin de crear un medio de soporte. Por el contrario, en el reactor con arena en figura 15 (B) el desarrollo radicular presenta mayor elongación y menor desarrollo de redes en las raíces, debido a que la existencia del medio de soporte facilita la distribución de rizomas en el volumen disponible.

**Figura 15. Desarrollo radicular de *P. australis* en tanque control y tanque con arena**



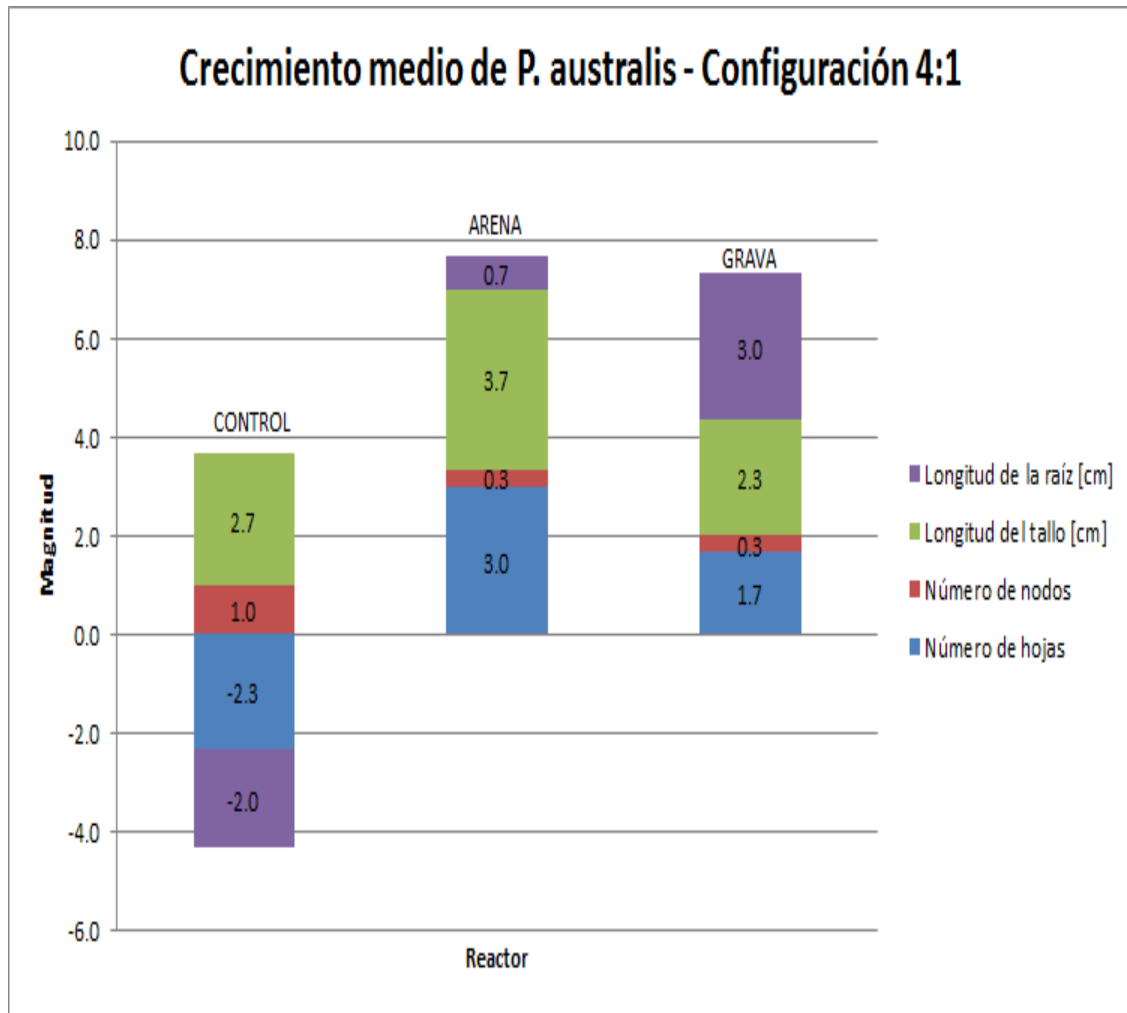
Fuente: Autores.

El desarrollo morfológico de las plantas (ANEXOS 15 y 16) está directamente relacionado con la eficiencia hidráulica de los reactores, ya que en el reactor de grava se presentaron pocas zonas muertas e índices bajos de cortos circuitos, valores opuestos a los reportados en el reactor control.

En la figura 16 se reporta la magnitud media del incremento de los parámetros evaluados en la vegetación, en configuración 4:1 y se observa que las plantas ubicadas en el reactor con grava presentaron crecimiento de la rizosfera (rizomas y raíces) más pronunciado, e incremento proporcional de la longitud del tallo. Por

el contrario, en el reactor control sólo se presentó desarrollo radicular de microfilamentos, y la elongación del tallo se debe a la actividad metabólica normal de las raíces.

**Figura 16. Crecimiento medio de *P. australis* en configuración 4:1.**

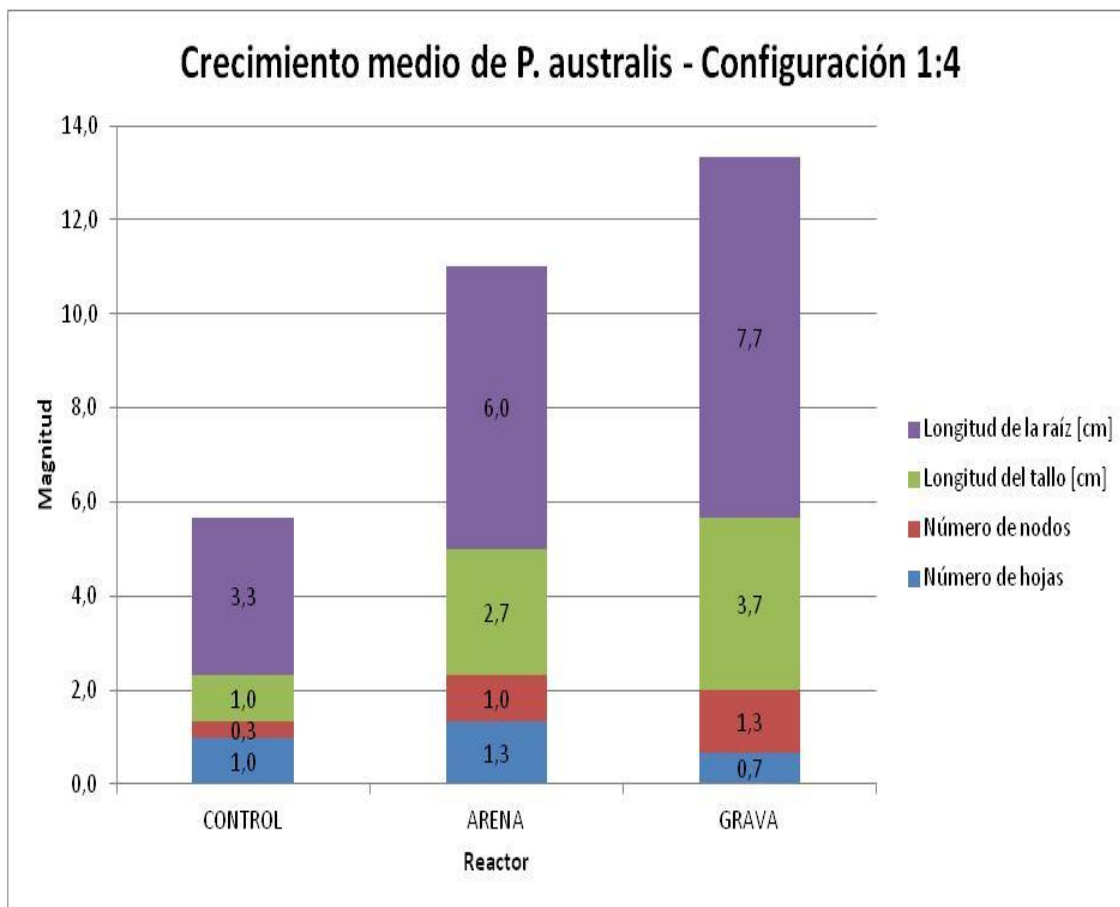


Fuente: Autores.

El análisis de desarrollo morfológico (ANEXO 17 y 18) en los reactores de configuración 1:4 permitió establecer un patrón de crecimiento entre reactores (figura 17), del cual se destaca el óptimo desarrollo de los individuos del reactor de grava y el deficiente grado de crecimiento de los individuos del reactor control. Lo anterior está directamente relacionado con los resultados obtenidos acerca del comportamiento hidráulico de los reactores, ya que la ausencia de zonas muertas

y cortos circuitos garantiza mayor tiempo de contacto entre la rizosfera y el contaminante, lo cual favorece el desarrollo morfológico debido a la abundancia de nutrientes en el medio.

**Figura 17. Crecimiento medio de *P. australis* en configuración 1:4.**



Fuente: Autores.

## 5.4 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

### 5.4.1 Análisis estadístico de la variabilidad de los reactores en la configuración 4:1

Los métodos de análisis estadísticos utilizados fueron un ANOVA de un factor, Scheffé y Dunnet, para determinar la variabilidad entre los reactores en términos de medio filtrante para cada configuración en el estudio de trazadores. En la tabla

19 se presentan los resultados obtenidos de la ANOVA de un factor para los reactores en configuración 4:1.

**Tabla 19. Resultados obtenidos en ANOVA de un factor para configuración 4:1.**

	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media Cuadrática	F	Significancia
<b>Inter-grupos</b>	95,132	2	47,566	24,329	,000
<b>Intra-grupos</b>	246,350	126	1,955		
<b>Total</b>	341,482	128			

Fuente: Autores.

Los valores obtenidos en la suma de cuadrados indican que existe mayor diferencia dentro de cada grupo de datos (intra-grupos) que entre los grupos (inter-grupos), de modo que los tratamientos de grava, arena y control tienen una tendencia con mayor similitud entre ellos, que la existente dentro del grupo de datos de cada tratamiento. De acuerdo a lo anterior, analizando el cociente del test estadístico F y el valor de significancia, se estableció que existen diferencias significativas entre las medias de cada tratamiento, de modo que no existe tendencia en la DTR.

En el análisis post hoc se caracterizaron los tratamientos con valores numéricos, siendo 1 el reactor de arena, 2 el de grava y 3 el control. Los resultados de los análisis mediante métodos post hoc Scheffé y Dunnet para configuración 4:1 se presentan en la tabla 20. Los resultados de las pruebas de Dunnet y de Scheffé, mediante el análisis del intervalo en que se ubican los límites inferior y superior, indican que existe una tendencia similar entre los tratamientos Control y Arena, lo cual es apreciable gráficamente, ya que la curva del tratamiento de Grava es la única que no describe una tendencia lineal en la mayor parte de sus datos.

**Tabla 20. Pruebas post hoc de Scheffé y Dunnet para configuración 4:1.**

		Tratamiento		Significancia	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite inferior	Límite superior
<b>Scheffé</b>	1	2	,000	-2,785930	-1,291928	
		3	,170	-1,318537	,175465	
	2	1	,000	1,291928	2,785930	
		3	,000	,72092	2,214394	
	3	1	,170	-1,75465	1,318537	
		2	,000	-2,214394	-,720392	
<b>t de Dunnet</b>	1	3	,108	-1,246166	,103094	
	2	3	,000	,792763	2,142024	

Fuente: Autores.

#### 5.4.2 Análisis estadístico de la variabilidad de los reactores en la Configuración 1:4

La ANOVA de un factor se aplicó a los grupos de datos obtenidos de las pruebas de conductividad realizadas en los reactores de grava, arena y control en configuración 1:4, con el fin de analizar la variabilidad de los datos al relacionar los grupos entre sí. En la tabla 21 se presentan los resultados obtenidos de la ANOVA de un factor para los reactores en configuración 1:4.

**Tabla 21. Resultados obtenidos en ANOVA de un factor para configuración 1:4.**

	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media Cuadrática	F	Significancia
<b>Inter-grupos</b>	194,639	2	97,320	42,719	,000
<b>Intra-grupos</b>	594,591	261	2,278		
<b>Total</b>	789,230	263			

Fuente: Autores.

El valor resultante de las medias cuadráticas y su respectivo cociente F ( $\gg 1$ ), permiten concluir que los grupos presentan diferencias significativas entre sí. El nivel de significancia es inferior a 0,05, lo cual indica que la hipótesis nula debe ser rechazada; por tanto, se ratifica la diferencia entre los grupos grava, arena y control, en configuración 1:4.

Los resultados de los métodos post hoc de Scheffé y Dunnet aplicados a los grupos 1, 2 y 3, correspondientes a los datos de los reactores de arena, grava y control, respectivamente, se reportan en la tabla 22.

**Tabla 22. Pruebas post hoc de Scheffé y Dunnet para configuración 1:4.**

	Tratamiento		Significancia	Intervalo de confianza al 95%	
				Límite inferior	Límite superior
<b>Scheffé</b>	1	2	,887	-,448853	,671504
		3	,000	1,314390	2,434746
	2	1	,887	-,671504	,448853
		3	,000	1,203065	2,323421
	3	1	,000	-2,434746	-1,314390
		2	,000	-2,323421	-1,203065
<b>t de Dunnet</b>	1	3	,000	1,368481	2,380655
	2	3	,000	1,257156	2,269330

Fuente: Autores.

Con base en las dos pruebas estadísticas aplicadas (Scheffé y t de Dunnet), resulta viable establecer que los reactores con arena y grava difieren en términos de concentración promedio del reactor control. No obstante, el comportamiento promedio del reactor con arena y el reactor con grava es semejante, tal como lo indica el test de Scheffé mediante el establecimiento de los límites inferior y superior.

#### 5.4.3 Evaluación de las mejores condiciones

Con base en los análisis realizados, es posible señalar que las mejores condiciones de operación del diseño planteado para tratamiento con flujo subuperficial de agua residual doméstica usando *P. australis*, es el reactor con configuración largo:ancho de 4:1, usando grava como material filtrante, debido a que el valor de TRH real fue el más cercano al TRH teórico, con una mejor eficiencia hidráulica, y con la menor proporción de cortos circuitos y zonas muertas, en comparación con los demás reactores. Adicionalmente, los análisis de remoción y de crecimiento vegetal, corroboran los resultados hidráulicos.

## 6 CONCLUSIONES

- Los parámetros de diseño evaluados para una unidad de tratamiento terciario con flujo subsuperficial a nivel de laboratorio demostraron que la utilización de grava como medio filtrante en un reactor y la configuración geométrica 4:1 a un tiempo de retención hidráulica de 30 horas contribuyen al mejoramiento de las condiciones hidráulicas. Estos parámetros incrementaron la eficiencia de remoción de nitrógeno, fósforo y sulfuros para aguas residuales domésticas extraídas de un conjunto residencial. Adicionalmente la implementación de grava como medio filtrante optimizó la distribución del flujo, reduciendo de manera significativa el porcentaje de zonas muertas y la presencia de cortos circuitos.
- Según la comparación de los porcentajes de eficiencia obtenidos en los reactores de las configuraciones 4:1 (20-90%) y 1:4 (40-65%), la presencia de baffles contribuye al mejoramiento de la distribución del flujo en la configuración 1:4, y el medio filtrante determina la distribución del flujo de los reactores en configuración 4:1.
- El estudio del trazador de KCl demostró que en una unidad de tratamiento terciario con flujo subsuperficial la ausencia de sustrato afecta negativamente la eficiencia de remoción de los contaminantes, debido a la presencia de zonas muertas y cortos circuitos que disminuyen la eficiencia hidráulica.
- En una unidad de tratamiento terciario con flujo subsuperficial la ausencia de sustrato presenta menor área superficial para el desarrollo de consorcios microbianos (adhesión al sustrato) en la planta *P. australis*.
- Las mejores condiciones hidráulicas en una configuración geométrica 4:1 y la utilización de grava como sustrato a un tiempo de retención hidráulico de 30 horas favorecen la actividad metabólica de *Phragmites australis*. Las plantas presentaron un crecimiento mayor en promedio de hojas, tallos y raíces de 1,7, 2,3cm y 3cm respectivamente. Estas características generaron mejores



resultados en la remoción de fósforo y sulfuros para el agua residual doméstica en el estudio; la remoción de nitrógeno presentó valores inferiores al reactor de configuración 4:1 de arena, con una diferencia de 5%.

- Bajo las condiciones de geometría de 4:1 y utilizando un sustrato de grava se obtuvieron altos porcentajes de remoción de nitrógeno, fosforo y sulfuros utlizando *P. australis* en ARD. Estos porcentajes de remoción correspondieron a 7% de nitrógeno, 91% de fosforo y 11% para sulfuros en un tiempo de retención hidráulico de 30 horas.

## 7 RECOMENDACIONES

- Para complementar los estudios de la eficiencia de remoción de nitrógeno en aguas residuales domesticas utilizando *P. australis* es necesario realizar un estudio enfocado en la identificación y cuantificación de la microbiota involucrada en las raíces de la plantas. Este estudio complementario permitiría comparar con más efectividad los resultados obtenidos en la literatura (Santoyo *et al.*, 2007; Wathugala, 1987; Lee, 2009 entre otros) con los reportados en el presente estudio.
- Para optimizar los resultados obtenidos del estudio de trazadores con sales (KCl, KBr, NaCl, etc..), es necesario realizar lavados prolongados en los reactores con sustrato (grava o arena) para evitar que su aporte de elementos interfiera con resultados (curva DTR).
- Con las condiciones hidráulicas utilizando una configuración de 4:1, un sustrato de grava y un tiempo de retención de 30 horas se pueden plantear proyectos de investigación para aguas residuales domesticas de conjuntos residenciales con afluentes de mayor concentración de nitrógeno, fósforo y sulfuros para evaluar la capacidad del sistema de tratamiento terciario.
- Con el fin de evaluar los efectos de competencia vegetativa sobre los porcentajes de remoción, es pertinente analizar diferentes densidades de carrizos (individuos por m<sup>2</sup>) en los reactores diseñados para el tratamiento terciario con flujo subsuperficial a nivel de laboratorio.
- La distancia entre barreras y la altura de lámina de agua deben ser contempladas en reactores con caudales muy bajos, pues su respuesta es directo sobre parámetros hidráulicos y puede resultar en altos porcentajes de zonas muertas (caso de control en configuración 4:1).

## 8 BIBLIOGRAFÍA

ARIAS M., S. M. 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. Universidad Industrial de Santander. 2010. p. 16-20

CURT, M. Manual de Fitodepuración: Filtros de macrófitas en Flotación - Cap. 7 Macrófitas de interés en fitodepuración. N.d. p. 91–106.

ESTRADA, I. Monografía sobre humedales artificiales de flujo subsuperficial (HAFSS) para remoción de metales pesados en aguas residuales. 2010. p. 45-54, 59, 62.

GARCÍA, J., CHIVA, J., AGUIRRE, P., ÁLVAREZ, E., SIERRA, J. P., & MUJERIEGO, R. Hydraulic behaviour of horizontal subsurface flow constructed wetlands with different aspect ratio and granular medium size. *Ecological Engineering*. 23(3). 2004. p. 177–187.

GONZALÍAS, A., KUSCHK, P., WIESSNER, A., JANK, M., KÄSTNER, M., & KÖSER, H. Treatment of an artificial sulphide containing wastewater in subsurface horizontal flow laboratory-scale constructed wetlands. *Ecological Engineering*, 31(4). 2007. p. 259–268.

KADLEC, R. H.; KNIGHT, R. L. *Treatment wetlands*. Boca Raton Florida: Lewis Publishers. 1996. p. 893.

KALIPCI, E. Investigation of decontamination effect of *Phragmites australis* for Konya domestic wastewater treatment, 5(29). 2011. 6571–6577.

LARA, J. A. *Depuración de Aguas Residuales Municipales con Humedales Artificiales*. Instituto Catalán de Tecnología, Universidad Politécnica de Cataluña. 1999.

LEE, C., FLETCHER, T. D., & SUN, G. Nitrogen removal in constructed wetland systems. *Engineering in Life Sciences*, 9(1). 2009. 11–22.

MANAHAN, S. *Environmental Chemistry*. CRC Press. Octava Edición. 2005.

MASTROCICCO, M., PROMMER, H., PASTI, L., PALPACELLI, S., & COLOMBANI, N. Evaluation of saline tracer performance during electrical conductivity groundwater monitoring. *Journal of contaminant hydrology*, 123(3-4). 2011. 157–66.

METCALF, G. E. *A distributional analysis of an environmental tax shift*. 1998.

METCALF & EDDY, *Ingeniería de aguas residuales: Tratamiento, vertido y reutilización*, 3ª Ed, McGraw-Hill, 1995.

PEÑA, M., GINNEKEN, M., & MADERA, C. A. Humedales de Flujo Subsuperficial : Una Alternativa Natural para el Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas en Zonas Tropicales. *Ingeniería y competitividad*, 5(1). 2003. 27–35.

PÉREZ, G., ENCISO, S., DEL PRADO, M., CASTAÑÓN, J., *Diseño hidráulico de un humedal artificial a nivel laboratorio*. División de Estudios de Posgrado e Investigación, Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez. 1992. p. 3-5

PERSSON, J., SOMES, N., & WONG, T. H. F. Hydraulics efficiency of constructed wetlands and ponds. *Water, Science and Technology*, 40(3). 1999. 291–300.

RAMÍREZ, E., ROBLES, E., DE LA CERDA, J. M., LÓPEZ, M., SAINZ, G., MARTÍNEZ, M. E., & BONILLA, P. Caracterización físico-química y biológica de un lecho de macrófitas con pretratamiento anaerobio. Unam (Universidad Autónoma de México). 1994.

*Manual de la Convención de Ramsar: Guía a la Convención sobre los Humedales (Ramsar, Irán, 1971)*, 6a. edición. Secretaría de la Convención de Ramsar, Gland (Suiza). 2013.

REED, SC., Natural system for wastewater management and treatment. Mc Graw Hill Book Company, 1988. p. 164-202.

RESTREPO, R. Validación de la funcionalidad de los índices de contaminación frente a la dispersión de las comunidades bióticas en humedales del Magdalena Medio. Universidad Industrial de Santander. Colombia. 2004.

ROMERO, J. Acuitratamiento por lagunas de estabilización. Escuela Colombiana de Ingenieros. 1ra Edición. Bogotá. 1994.

ROMERO, J. BRIX, H., & Com, F. A. Interactive effects of N and P on growth nutrient allocation and NH<sub>4</sub> uptake kinetics by *Phragmites australis*. Aquatic botany - Isevier, 64. 1999. 369–380.

SABAS, C., Universidad T. de P. Evaluación hidrodinámica de humedales construidos a escala de laboratorio. 2011. p. 17-25.

SANTOYO, C., ROJAS, C., CASTILLO, L., Evaluación del funcionamiento y operación de un humedal de flujo subsuperficial (FSS) horizontal como postratamiento de las aguas residuales domésticas provenientes de reactores anaerobios tipo UASB en la PTAR de Río Frío. Universidad Pontificia Bolivariana. 2007

The Ramsar Convention on wetlands of International Importance Especially as Waterfowl Habitat. 1971. Final text. Ramsar, Iran.

Tratamiento de agua para consumo humano: Plantas de filtración rápida – Manual III: Evaluación de plantas de tecnología apropiada. Organización Panamericana de la Salud (OPS). Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS). Lima. 2005.

VYMAZAL, J., & KRŮPFELOVÁ, L. Growth of *Phragmites australis* and *Phalaris arundinacea* in constructed wetlands for wastewater treatment in the Czech Republic. Ecological Engineering, 25(5). 2005. p. 606–621.

VYMAZAL, J., & KRÖPFELOVÁ, L. Nitrogen and phosphorus standing stock in *Phalaris arundinacea* and *Phragmites australis* in a constructed treatment wetland: 3-year study. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 54(3). 2008. p. 297–308.

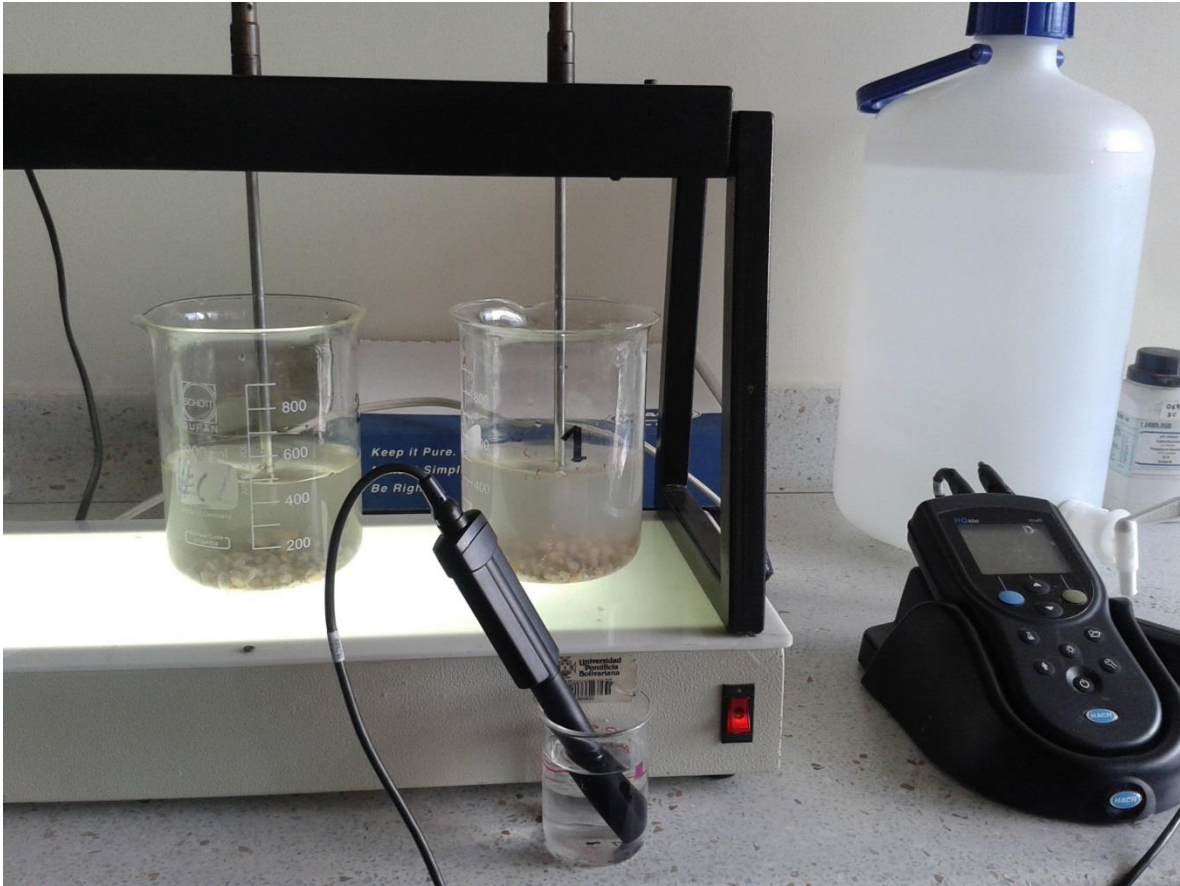
WATHUGALA, A. G., & SUZUKI, T. From waste water using sand filtration influent. 21(10). 1987. p. 1217–1224.

WIESSNER, A., GONZALIAS, A., KÄSTNER, M., & KUSCHK, P. Effects of sulphur cycle processes on ammonia removal in a laboratory-scale constructed wetland planted with *Juncus effusus*. *Ecological Engineering*, 34(2). 2008. p. 162–167.

ZATARAY, J. P., CHONG, S., RADILLA, R., RAMOS, R., FERNANDO, T., VELEZ, E., RODRIGUEZ, J. G. Diseño de un sistema de humedales de flujo subsuperficial (SSF) para el tratamiento terciario del agua del río Tecate, una alternativa de reuso. 2006. p. 1–8.

# ANEXOS

**Anexo 1. Análisis de conductibilidad en pruebas preliminares de grava, arena y agua potable.**



**Fuente: Autores.**



**Anexo 2. Evaluación de adaptación y crecimiento de *P. australis*.**



***Fuente: Autores.***

**Anexo 3. Resultados prueba de trazador. Conductividad (uS/cm) vs. tiempo en configuración 1:4.**

<b>ARENA</b>	<b>GRAVA</b>	<b>CONTROL</b>	<b>Tiempo</b>
96.9	87	148.10	0
96.8	87.3	146.4	0.5
96.9	87.5	145.40	1
96.9	88.3	145.7	1.5
96.9	87.7	145.8	2
96.9	88.1	149	2.5
97.5	88.4	152.3	3
99.1	88.8	153.8	3.5
100.2	89.3	155.1	4
234	101.9	155.5	4.5
425	178.3	156.3	5
507	356	156.9	5.5
516	491	157.5	6
518	583	158.7	6.5
519	629	159.8	7
613	637	161.2	7.5
622	641	160.8	8
603	628	160.1	8.5
587	599	159.7	9
598	564	167.9	9.5
584	539	209.8	10
570	503	266.00	10.5
558	477	304	11
547	446	323	11.5
541	423	321	12
523	397	313	12.5
504	372	313	13
489	349	317	13.5
473	323	323	14
474	301	333	14.5
497	289	344	15
532	273	364	15.5
587	260	386	16
591	250	399	16.5
598	242	403	17

<b>609</b>	239	399	17.5
<b>613</b>	238	389	18
<b>607</b>	238	376	18.5
<b>578</b>	238	363	19
<b>576</b>	239	353	19.5
<b>562</b>	239	342	20
<b>535</b>	240	337	20.5
<b>520</b>	244	331	21
<b>517</b>	248	327	21.5
<b>506</b>	257	322	22
<b>316</b>	258	483	22.5
<b>308</b>	263	463	23
<b>299</b>	287	437	23.5
<b>289</b>	305	379	24
<b>280</b>	331	364	24.5
<b>271</b>	364	346	25
<b>263</b>	383	321	25.5
<b>258</b>	401	307	26
<b>251</b>	416	282	26.5
<b>246</b>	432	278	27
<b>241</b>	446	260	27.5
<b>238</b>	455	251	28
<b>234</b>	458	247	28.5
<b>232</b>	454	240	29
<b>230</b>	443	234	29.5
<b>229</b>	428	230	30
<b>226</b>	416	188.7	30.5
<b>225</b>	400	190.4	31
<b>224</b>	389	149.5	31.5
<b>223</b>	364	141.5	32
<b>222</b>	338	127.1	32.5
<b>221</b>	316	125.3	33
<b>219.4</b>	293	119.4	33.5
<b>217.9</b>	275	119.3	34
<b>216.9</b>	259	118.6	34.5
<b>216.1</b>	241	121	35
<b>215.5</b>	232	121.8	35.5
<b>213.8</b>	221	120.8	36
<b>212.9</b>	212.7	119.9	36.5
<b>212.5</b>	199.2	119.8	37

<b>212.2</b>	191.1	119.4	37.5
<b>212</b>	184	119.5	38
<b>211.7</b>	177	119	38.5
<b>211.4</b>	169.6	118.8	39
<b>211.3</b>	162.6	118.4	39.5
<b>211</b>	159.5	118.2	40
<b>210.9</b>	155.3	118.2	40.5
<b>210.7</b>	150.7	118.3	41
<b>210.8</b>	145.7	118.8	41.5
<b>211</b>	142.4	118.9	42
<b>211.2</b>	139.7	119.3	42.5
<b>211.9</b>	134.5	119.5	43
<b>212</b>	132.7	120.1	43.5
<b>212.5</b>	129.7	122.4	44
<b>212.7</b>	126.3	131.9	44.5
<b>213.4</b>	123.3	138.9	45
<b>214</b>	121.4	141.9	45.5
<b>214.7</b>	119.4	146.7	46
<b>215.3</b>	118.7	146.4	46.5
<b>215</b>	118.3	138.4	47
<b>215.7</b>	121	134.9	47.5
<b>216.1</b>	124.6	133	48
<b>218.6</b>	126.5	130.7	48.5
<b>219.6</b>	130.5	129.1	49
<b>221</b>	135.6	129.1	49.5
<b>223</b>	141.6	130.1	50
<b>224</b>	147	129.9	50.5
<b>225</b>	153.9	131.9	51
<b>226</b>	161.5	132.5	51.5
<b>226</b>	168.8	133.4	52
<b>227</b>	177.8	132.6	52.5
<b>227</b>	182.6	132.5	53
<b>228</b>	183.3	132.2	53.5
<b>229</b>	181.7	132.2	54
<b>230</b>	178.6	132.4	54.5
<b>231</b>	173.2	132.4	55
<b>231</b>	167.6	132.3	55.5
<b>232</b>	163.6	132.1	56
<b>232</b>	158	131.6	56.5
<b>233</b>	152.3	131.2	57

<b>233</b>	145.4	130.9	57.5
<b>233</b>	141.4	130.5	58
<b>233</b>	138.7	130.4	58.5
<b>234</b>	132.4	130.3	59
<b>234</b>	128.8	130.2	59.5
<b>235</b>	126.1	130.3	60
<b>235</b>	122.8	130.3	60.5
<b>235</b>	120.7	130.4	61
<b>236</b>	119.2	130.6	61.5
<b>237</b>	117.2	130.8	62
<b>237</b>	116.4	130.8	62.5
<b>237</b>	116	130.9	63
<b>237</b>	114.4	131	63.5
<b>237</b>	116.4	131.2	64
<b>237</b>	116.5	131.3	64.5
<b>238</b>	116.1	131.5	65
<b>238</b>	114.9	131.8	65.5
<b>238</b>	113.7	132.6	66
<b>239</b>	111.2	132.4	66.5
<b>239</b>	109.8	132.8	67
<b>239</b>	108.6	133	67.5
<b>238</b>	107.7	133.4	68
<b>237</b>	105.4	133.6	68.5
<b>237</b>	103.9	133.6	69
<b>236</b>	102.3	133.7	69.5
<b>236</b>	101.3	133.5	70
<b>237</b>	100.1	134.1	70.5
<b>237</b>	99.4	134.7	71
<b>238</b>	99.6	134.6	71.5
<b>238</b>	100.9	134.5	72
<b>237</b>	104.4	134.8	72.5
<b>237</b>	108.1	134.8	73
<b>237</b>	111.5	135.1	73.5
<b>238</b>	114.1	135.4	74
<b>241</b>	116.1	135.7	74.5
<b>241</b>	117.8	135.8	75
<b>240</b>	119	135.7	75.5
<b>240</b>	120	135.7	76
<b>241</b>	120.4	135.7	76.5
<b>242</b>	120.5	135.7	77

<b>244</b>	119.9	135.8	77.5
<b>244</b>	118.5	135.8	78
<b>245</b>	115.9	135.8	78.5
<b>246</b>	114.3	135.9	79
<b>247</b>	111.2	135.9	79.5
<b>249</b>	108.7	136	80
<b>249</b>	106.7	136	80.5
<b>136.1</b>	104.3	136.1	81
<b>250</b>	101.8	135.9	81.5
<b>250</b>	100.3	135.9	82
<b>250</b>	97.8	135.9	82.5
<b>251</b>	97.4	135.9	83
<b>251</b>	97.8	136	83.5
<b>252</b>	98.2	135.9	84
<b>253</b>	98.6	135.8	84.5
<b>253</b>	99.1	135.7	85
<b>254</b>	99.4	135.7	85.5
<b>254</b>	99.5	135.9	86
<b>265</b>	99.4	135.9	86.5
<b>242</b>	99.1	135.8	87
<b>234</b>	98.7	135.8	87.5
<b>229</b>	97.9	135.8	88
<b>224</b>	96.9	135.9	88.5
<b>220</b>	96	135.8	89
<b>215</b>	94.6	135.7	89.5
<b>209.6</b>	93.2	135.7	90
<b>205.5</b>	91.8	135.7	90.5
<b>202.1</b>	90.9	135.7	91
<b>199.6</b>	90.1	135.6	91.5
<b>197.4</b>	89.7	135.6	92
<b>195.6</b>	89.3	135.6	92.5
<b>194</b>	89.2	135.6	93
<b>192.4</b>		135.7	93.5
<b>191</b>		135.6	94
<b>189.8</b>		135.7	94.5
<b>188.4</b>		135.6	95
<b>187</b>		135.7	95.5
<b>185.9</b>		135.7	96
<b>184.7</b>			

**Anexo 4. Resultados prueba de trazador. Conductividad (uS/cm) vs. tiempo en configuración 4:1.**

<b>ARENA</b>	<b>GRAVA</b>	<b>CONTROL</b>	<b>Tiempo</b>
224	110.2	96.2	0.00
224	109	96.1	0.50
224	106.8	108.7	1.00
224	104.5	93.3	1.50
224	102	93.2	2.00
224	99.7	96.5	2.50
225	97.9	357	3.00
224	93.8	653	4.00
224	92.6	629	4.50
223	91.2	590	5.00
223	89.5	401	5.50
223	88.1	168.3	6.00
222	86.9	153.7	6.50
222	96.1	158	7.50
221	159.6	143	8.50
220	272	137.5	9.50
220	397	128.7	10.50
220	470	125.7	11.50
218.9	516	127	12.50
218.3	567	125	13.50
217.9	588	120.9	14.50
218	603	117.2	15.50
211	428	113.9	23.50
211.9	416	114.1	24.50
210	422	114.1	25.50
211	398	114.7	26.50
210.7	425	114.3	27.50
210.1	454	114.7	28.50
210	474	114.2	29.50
210.3	467	114.5	30.50
210.9	441	114	31.50
211.6	410	113.5	32.50
211.9	375	113.8	33.50
211.7	344	113.3	34.50
211.2	323	113.5	35.50
211.6	317	113.5	36.50
211.4	393	113.3	37.50

<b>211.8</b>	275	113	38.50
<b>212.4</b>	253	113	39.50
<b>214.2</b>	143.9	112.5	47.50
<b>215</b>	130.7	112.7	49.00
<b>215.5</b>	131	113.7	50.00
<b>213.7</b>	133.2	113.6	51.00
<b>215.3</b>	144.6	113.8	52.00
<b>215.7</b>	151.8	114.3	53.00
<b>215.8</b>	149.7	114.6	54.00
<b>218.4</b>	144.2	114.4	55.00
<b>219.3</b>	140.6	113.6	56.00
<b>219.6</b>	134.4	113.8	57.00
<b>220</b>	124.5	113.5	58.00
<b>221</b>	118	113.5	59.00
<b>221</b>	112.8	113.3	60.00
<b>221</b>	109.3	113.3	61.00
<b>222</b>	108.6	113.5	62.00
<b>221</b>	107.9	112.7	63.00
<b>222</b>	110	112.8	71.50
<b>224</b>	107.8	112.5	72.50
<b>224</b>	106.3	112.4	73.50
<b>224</b>	105.2	111.8	74.50
<b>224</b>	103.6	112.5	75.50
<b>224</b>	101.6	112.2	76.50
<b>225</b>	100	112.4	77.50
<b>225</b>	97.8	112.6	78.50
<b>227</b>	94.4	112.7	79.50
<b>226</b>	92	112.1	80.50
<b>227</b>	90.8	112.5	81.50
<b>227</b>	90.8	112.4	82.50
<b>227</b>	90	112.2	83.50
<b>227</b>	90.6	111.9	84.50
<b>227</b>	91.3	111.8	85.50
<b>228</b>	91.2	111.9	86.50
<b>227</b>	92.6	112	87.50
<b>227</b>	94.7	111.6	95.50
<b>226</b>	93.2	111.8	96.50
<b>227</b>	92.8	112	97.50
<b>226</b>	91.7	112.4	98.50
<b>225</b>	90.9	112	99.50



<b>230</b>	91.7	112.5	100.50
<b>228</b>	92.3	112.2	101.50
<b>229</b>	93.1	111.9	102.50
<b>228</b>	93.8	111.9	103.50
<b>228</b>	93.5	111.7	104.50
<b>229</b>	93.4	111.8	105.50
<b>229</b>	93.4	111.5	106.50
<b>226</b>	93.1	111.3	107.50
<b>226</b>	93.3	111.5	108.50
<b>225</b>	93.7	111.4	109.50
<b>222</b>	93.6	111.4	110.50
<b>221</b>	93	111.4	111.50
<b>200.5</b>	89.4	110.8	119.50
<b>199.2</b>	89.1	111.3	120.50
<b>197.6</b>	88.6	111.3	121.50
<b>195.9</b>	88.2	111.6	122.50
<b>194.5</b>	88.3	111.7	123.50
<b>193.6</b>	88.6	111.7	124.50
<b>193.1</b>	88.9	111.3	125.50
<b>192.5</b>	88.5	111.2	126.50
<b>188.7</b>	89.4	111	127.50
<b>191.1</b>	89.9	111.3	128.50
<b>191.4</b>	90.3	110.6	129.50

**Anexo 5. Datos iniciales para método de curva de tendencia configuración 4:1.**

Datos iniciales	Variable	Unidades	Reactores		
			Grava	Arena	Control
<b>Tiempo salida inicial trazador</b>	ti	Minutos	780	0	360
		Horas	13	0	6
<b>Tiempo salida 10%</b>	t10	Minutos	1055,052	543,025	404,405
		Horas	17,5842	9,050416667	6,740083333
<b>Tiempo salida 90%</b>	t90	Minutos	2238,98	5026,842	895,568
		Horas	37,31633333	83,7807	14,92613333
<b>Tiempo modal</b>	tp	Minutos	1260	4740	420
		Horas	21	79	7
<b>Tiempo mitad [ ] máxima</b>	tc	Minutos	630	2370	210
		Horas	10,5	39,5	3,5
<b>Tiempo mediano</b>	tm	Minutos	1555,784	2876,636	518,547
		Horas	25,92973333	47,94393333	8,64245
<b>Tiempo teórico de retención</b>	to	Minutos	1819,2	1761	1822,8
		Horas	30,32	29,35	30,38
<b>Tiempo [ ]/10 máxima</b>	tb	Minutos	126	474	42
		Horas	2,1	7,9	0,7
<b>Razón tiempo de inyección</b>	$\Delta t$	Minutos	5,49692E-05	5,67859E-05	5,48607E-05
		Horas	9,16154E-07	9,46432E-07	9,14344E-07
<b>Tiempo salida total</b>	tf	Minutos	3240	5640	1440
		Horas	54	94	24
<b>Concentración inicial</b>	Co	$\mu\text{s/cm}$	110,2	224	96,2
<b>Concentración máxima</b>	Cp	$\mu\text{s/cm}$	603	229	653

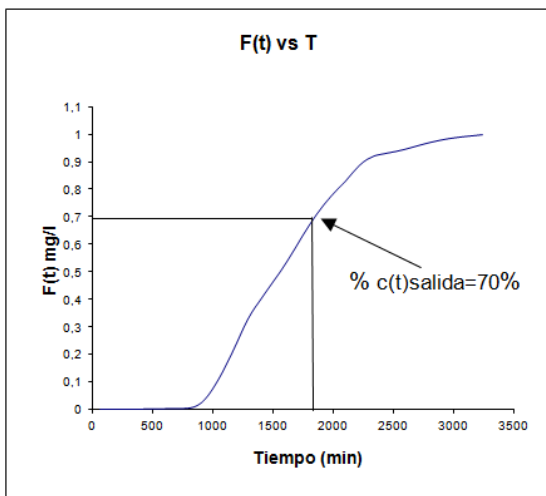
Fuente: Autores.

**Anexo 6. Datos de entrada para método de Wolf-Resnick.**

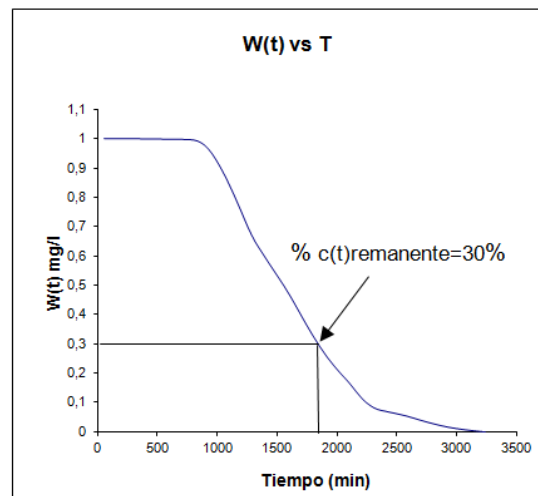
Criterio	Configuración 4:1			Configuración 1:4		
	Grava	Arena	Control	Grava	Arena	Control
<b>Θ</b>	0,500	0,000	0,167	0,194	0,150	0,361
<b>A</b>	51,796	17,692	79,796	43,202	38,409	64,895

**Fuente: Autores.**

**Anexo 7. Función concentración de salida (a.) y función de fracción remanente (b.) para Grava 4:1.**

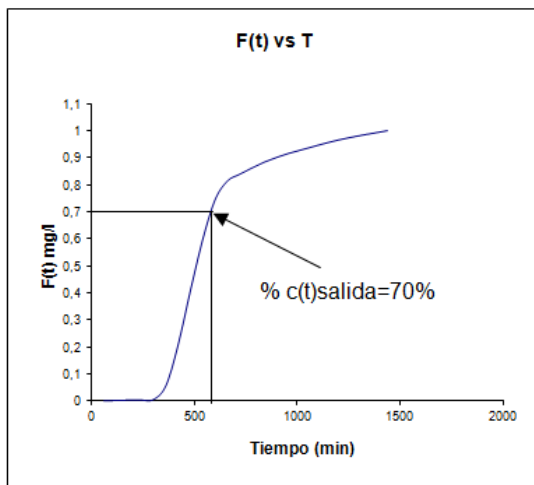


a.  
Fuente: Autores.

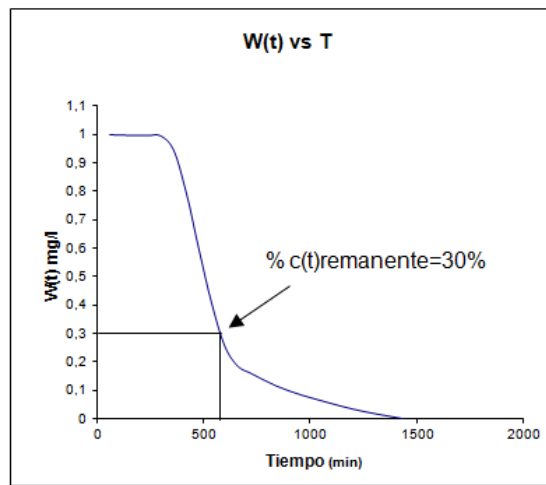


b.

**Anexo 8. Función concentración de salida (a.) y función de fracción remanente (b.) para Control 4:1.**

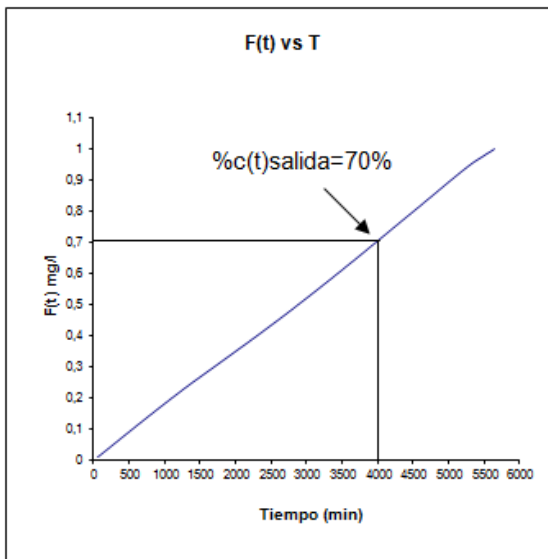


a.  
Fuente: Autores.

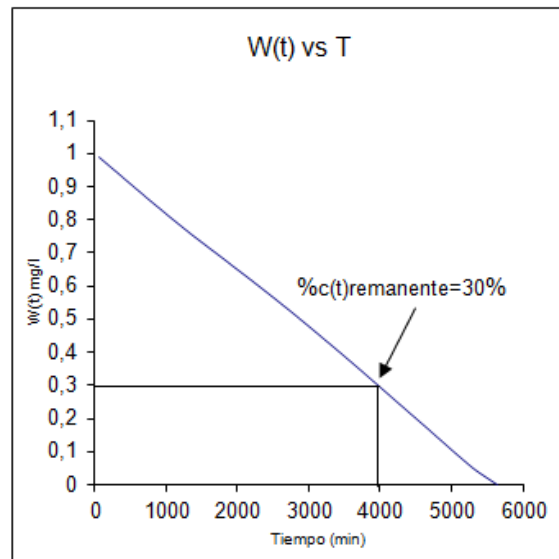


b.

**Anexo 9. Función concentración de salida (a.) y función de fracción remanente (b.) para Arena 4:1.**



a.  
Fuente: Autores.



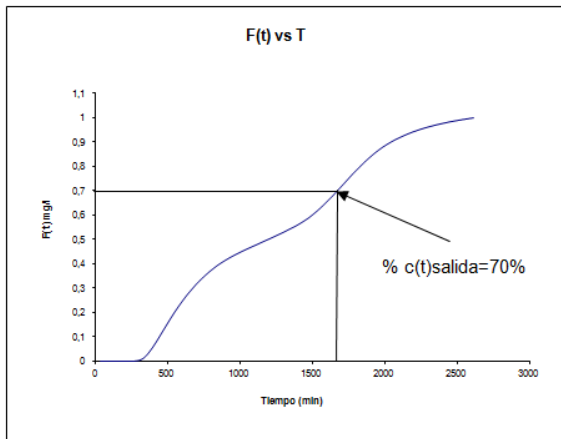
b.

**Anexo 10. Datos iniciales para método de curva de tendencia configuración 1:4.**

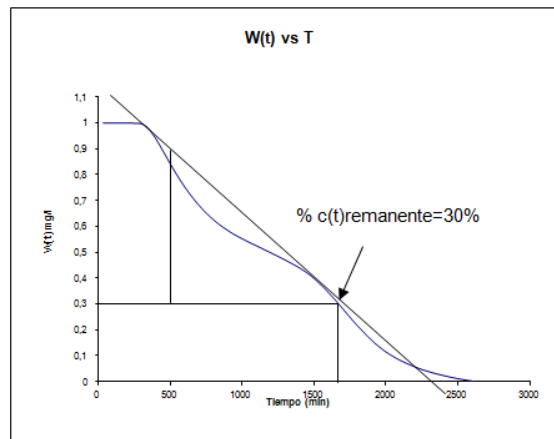
Datos iniciales	Variable	Unidades	Reactores		
			Grava	Arena	Control
<b>Tiempo salida inicial trazador</b>	ti	Minutos	240	210	150
		Horas	4	3,5	2,5
<b>Tiempo salida 10%</b>	t10	Minutos	445,347	475,278	588,293
		Horas	7,42245	7,9213	9,804883333
<b>Tiempo salida 90%</b>	t90	Minutos	2035,755	2046,545	1759,426
		Horas	33,92925	34,10908333	29,32376667
<b>Tiempo modal</b>	tp	Minutos	480	480	1350
		Horas	8	8	22,5
<b>Tiempo mitad [ ] máxima</b>	tc	Minutos	240	240	675
		Horas	4	4	11,25
<b>Tiempo mediano</b>	tm	Minutos	1185,926	1003,402	1161,155
		Horas	19,76543333	16,72336667	19,35258333
<b>Tiempo teórico de retención</b>	to	Minutos	1819,2	1761	1822,8
		Horas	30,32	29,35	30,38
<b>Tiempo [ ]/10 máxima</b>	tb	Minutos	48	48	135
		Horas	0,8	0,8	2,25
<b>Razón tiempo de inyección</b>	$\Delta t$	Minutos	5,49692E-05	5,67859E-05	5,48607E-05
		Horas	9,16154E-07	9,46432E-07	9,14344E-07
<b>Tiempo salida total</b>	tf	Minutos	5520	2610	2610
		Horas	92	43,5	43,5
<b>Concentración inicial</b>	Co	$\mu\text{s/cm}$	87	96,9	148,1
<b>Concentración máxima</b>	Cp	$\mu\text{s/cm}$	641	622	483

Fuente: Autores.

**Anexo 11. Función concentración de salida (a.) y función de fracción remanente (b.) para Grava 1:4.**



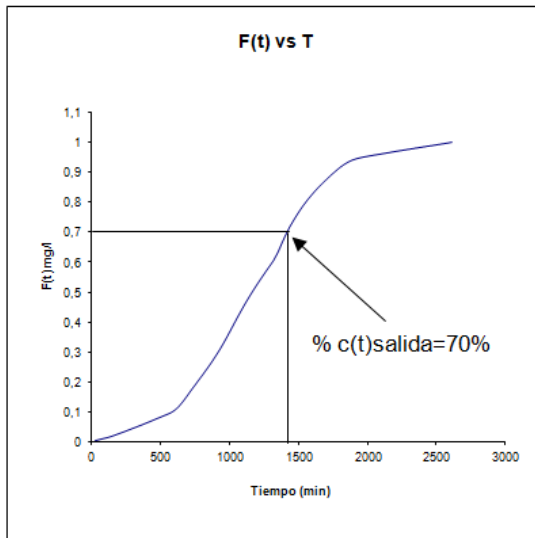
a.  
Fuente: Autores.



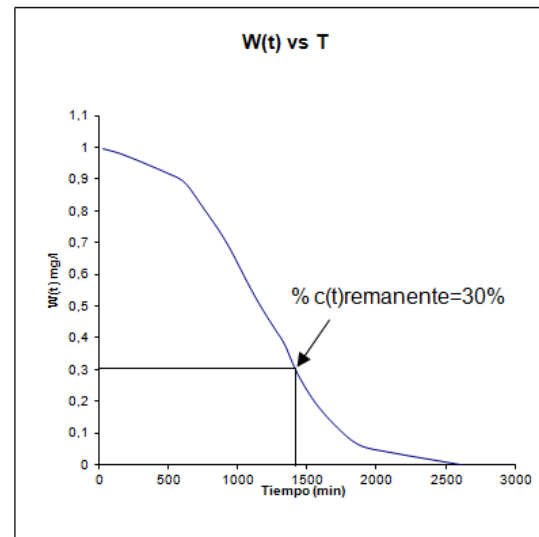
b.



**Anexo 12. Función concentración de salida (a.) y función de fracción remanente (b.) para *Control 1:4*.**



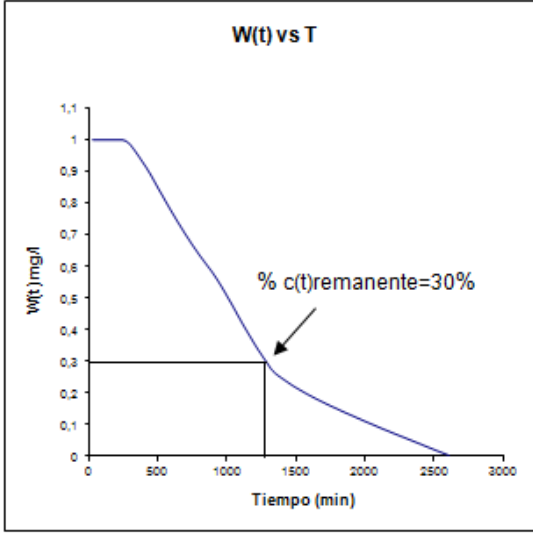
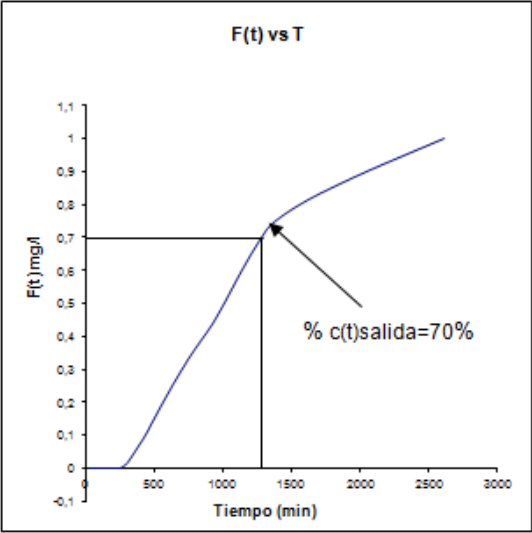
a.



b.

**Fuente: Autores.**

**Anexo 13. Función concentración de salida (a.) y función de fracción remanente (b.) para Arena 1:4.**



Fuente: Autores.

**Anexo 14. Resultados de remoción de Nitrógeno, Fósforo y Sulfuros, en mg/L, para configuración 1:4 y 4:1.**

Configuración	Prueba	Tiempo (h)	Nitrógeno			Fósforo			Sulfuros			Guía de Suministros parciales		
			Control	Grava	Arena	Control	Grava	Arena	Control	Grava	Arena	Nitrógeno	Fósforo	Sulfuros
1:4	1	0	5.5	5.5	5.5	5.3	5.3	5.3	56.2	56.2	56.2	5.5	5.3	56.2
		30	5.5	5.5	5.5	4.55	0.88	0.3	54.7	54.7	13.5	5.5	5.15	46.6
		60	5.5	5.5	5.5	4.4	0.87	0.6	49.1	62	32.6	5.5	6.3	13.5
	% Remoción		0	0	0	16.98 11321	83.58 49057	88.67 92453	12.63 3452	- 10.32	41.99 28826	0	- 18.86	75.97 86477
	2	0	5.5	5.5	5.5	6.4	6.4	6.4	43.5	43.5	43.5	5.5	6.4	43.5
		30	5.6	5.5	5.5	4.35	0.88	0.46	28.3	26.1	16.5	5.5	6.15	25.1
		60	5.5	5.6	5.5	4.72	2	0.61	33.3	58.1	35.5	6.16	6.25	21.6
	% Remoción		0	- 1.818 18182	0	26.25	68.75	90.46 875	23.44 82759	- 33.56	18.39 08046	-12	2.343 75	50.34 48276
	3	0	5.5	5.5	5.5	6.7	6.7	6.7	35.8	35.8	35.8	5.5	6.7	35.8
		30	5.5	5.5	5.5	4.8	1.52	1	88.2	64	38.4	5.5	7.1	64
		60	5.5	5.5	5.5	5.7	3.25	0.77	29.2	36.3	29.2	6.16	6.6	28.2
	% Remoción		0	0	0	14.92 53731	51.49 25373	88.50 74627	18.43 57542	- 1.396	18.43 57542	-12	1.492 53731	21.22 90503
4:1	1	0	5.5	5.5	5.5	6.9	6.9	6.9	7.84	7.84	7.84	5.5	6.9	7.84
		30	8.4	7	5.6	6.3	1.17	1.9	7.69	26.3	7.04	5.5	7.1	10.7
		60	8.4	5.6	5.5	6.8	1.05	10.3	8.72	7.69	7.18	5.5	7.2	8.72
	% Remoción		- 1.818 18182	0	1.449 27536	84.78 26087	- 49.27	- 11.22	1.913 26531	8.418 36735	0	- 4.347	- 11.22	

2	0	5.5	5.5	5.5	8	8	8	9.74	9.74	9.74	5.5	8	9.74
	30	8.12	5.5	5.5	5.95	1.09	1.32	35.3	33.8	42	5.5	6.3	32.8
	60	7.56	5.5	6.16	6.6	0.87	1.3	33.2	26.6	38.9	7.28	6.15	42
% Remoción		-	0	-12	17.5	89.12	83.75	-	-	-	-	23.12	-
		37.45 45455				5		240.8 62423	173.1 00616	299.3 83984	32.36 36364	5	331.2 11499
3	0	9.24	9.24	9.24	6.9	6.9	6.9	30.7	30.7	30.7	9.24	56.2	30.7
	30	8.96	5.5	5.5	6.8	1	1.168	11.8	15.4	20	5.88	46.6	24.1
	60	6.72	5.5	5.5	7.3	2.12	4.85	16.9	14.9	14.5	5.5	13.5	8.72
% Remoción		27.27	40.47	40.47	-	69.27	29.71	44.95	51.46	52.76	40.47	75.97	71.59
		27273	61905	61905	5.797 10145	53623	01449	11401	5798	87296	61905	86477	60912

Fuente: Autores.

**Anexo 15. Mediciones iniciales de los individuos seleccionados de *P. australis* en configuración 4:1.**

INICIAL				
CONTRO L	Número de hojas	Número de nodos	Longitud del tallo	Longitud de la raíz
<b>1</b>	23	22	107	22
<b>2</b>	11	20	112	30
<b>3</b>	19	22	108	23
ARENA	Número de hojas	Número de nodos	Longitud del tallo	Longitud de la raíz
<b>1</b>	8	11	81	20
<b>2</b>	4	9	69	22
<b>3</b>	6	12	78	38
GRAVA	Número de hojas	Número de nodos	Longitud del tallo	Longitud de la raíz
<b>1</b>	10	13	97	21
<b>2</b>	15	14	105	22
<b>3</b>	14	14	108	18

Fuente: Autores.

**Anexo 16. Mediciones finales de los individuos seleccionados de *P. australis* en configuración 4:1.**

FINAL					
CONTROL	Número de hojas	Número de nodos	Número de ápices	Longitud del tallo	Longitud de la raíz
<b>1</b>	21	24	6	110	17
<b>2</b>	9	21	0	115	30
<b>3</b>	16	22	2	110	22
ARENA	Número de hojas	Número de nodos	Número de ápices	Longitud del tallo	Longitud de la raíz
<b>1</b>	10	12	1	85	22
<b>2</b>	7	9	6	72	22
<b>3</b>	10	12	2	82	38
GRAVA	Número de hojas	Número de nodos	Número de ápices	Longitud del tallo	Longitud de la raíz
<b>1</b>	13	14	3	99	24
<b>2</b>	15	14	3	108	24
<b>3</b>	16	14	4	110	22

Fuente: Autores.

**Anexo 17. Mediciones iniciales de los individuos seleccionados de *P. australis* en configuración 1:4.**

<b>PREVIO</b>				
<b>CONTROL</b>	Número de hojas	Número de nodos	Longitud del tallo	Longitud de la raíz
<b>1</b>	11	18	87	31
<b>2</b>	16	24	82	35
<b>3</b>	10	16	82	29
<b>ARENA</b>	Número de hojas	Número de nodos	Longitud del tallo	Longitud de la raíz
<b>1</b>	10	14	78	31
<b>2</b>	11	15	89	50
<b>3</b>	9	13	102	41
<b>GRAVA</b>	Número de hojas	Número de nodos	Longitud del tallo	Longitud de la raíz
<b>1</b>	11	14	87	35
<b>2</b>	9	14	74	37
<b>3</b>	9	13	80	35

Fuente: Autores.

**Anexo 18. Mediciones finales de los individuos seleccionados de *P. australis* en configuración 1:4.**

<b>POSTERIOR</b>					
<b>CONTROL</b>	Número de hojas	Número de nodos	Número de ápices	Longitud del tallo	Longitud de la raíz
<b>1</b>	13	19	10	90	40
<b>2</b>	16	24	3	82	35
<b>3</b>	11	16	5	82	30
<b>ARENA</b>	Número de hojas	Número de nodos	Número de ápices	Longitud del tallo	Longitud de la raíz
<b>1</b>	12	15	5	82	40
<b>2</b>	11	15	5	90	50
<b>3</b>	11	15	3	105	50
<b>GRAVA</b>	Número de hojas	Número de nodos	Número de ápices	Longitud del tallo	Longitud de la raíz
<b>1</b>	13	17	4	97	40
<b>2</b>	9	14	5	75	40
<b>3</b>	9	14	8	80	50

Fuente: Autores.



**Anexo 19. Bomba peristáltica Masterflex 07519-25 de doce cartuchos.**



**Fuente: Autores.**

**Anexo 20. Sistema radicular de *P. australis* post-adaptación.**



**Fuente: Autores.**

**Anexo 21. Reactores construidos para el tratamiento de agua residual doméstica a escala de laboratorio**



Fuente: Autores.

**Anexo 22. Individuos de *P. australis* en proceso de adaptación al agua residual doméstica.**



Fuente: Autores.

El stock inicial de *P. australis* estaba conformado por 8 individuos adultos, de los cuales se cortaron 23 esquejes con el fin reactivar la actividad metabólica y aumentar el número de individuos a mediano y largo plazo (3-6 meses).

Los esquejes fueron distribuidos uniformemente en un recipiente con una dilución al 20% de ARD como primer acercamiento a la concentración objetivo. La concentración de ARD fue incrementada en un 20% cada semana a medida que se realizaban observaciones para registrar el desarrollo; la aparición de clorosis

y/o marchitamiento generalizado se tomó como indicador para alterar la frecuencia de cambio de concentración.

A partir del tercer mes, los individuos fueron trasladados a recipientes de mayor tamaño y en presencia de sustrato (grava y arena), pues el proceso de adaptación presentó óptimos resultados observables en su desarrollo radicular y proceso de elongación en ARD no diluida.

En un periodo de tiempo de seis meses se logró una reproducción masiva de la especie, obteniendo 132 individuos con una longitud media de 1m, y desarrollo masivo de la rizósfera (ANEXO 17) para su posterior selección y ubicación en los reactores (ANEXO 18). En esta etapa, se considera concluida la adaptación y se establecen condiciones constantes de mantenimiento para preservar el stock a utilizar en los tres sustratos: grava, arena y en ausencia de sustrato.