

00521  
6



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE QUÍMICA**

**EVALUACIÓN DE LA REMOCIÓN DE  
ORTOFOSFATOS EMPLEANDO COLUMNAS A  
PEQUEÑA ESCALA EMPACADAS CON DIFERENTES  
MATERIALES PÉTREOS**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERO QUÍMICO**

**PRESENTA**

**ENRIQUE ÁLVAREZ FAJARDO**



**EXAMENES PROFESIONALES  
FACULTAD DE QUÍMICA**

**MÉXICO, D. F.**

**2003**

A



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

## FACULTAD DE QUÍMICA

### Jurado asignado:

<b>Presidente</b>	<b>Prof. Rodolfo Torres Barrera</b>
<b>Vocal</b>	<b>Prof. Víctor Manuel Luna Pabello</b>
<b>Secretario</b>	<b>Prof. José Luis López Martínez</b>
<b>1er. Suplente</b>	<b>Prof. Baldomero Pérez Gabriel</b>
<b>2o. Suplente</b>	<b>Prof. Alfonso Durán Moreno</b>

### Sitio donde se desarrolló el tema:

**Laboratorio de Microbiología Experimental**

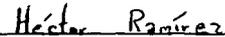
### Asesor:

**Dr. Víctor Manuel Luna Pabello**

  
Firma

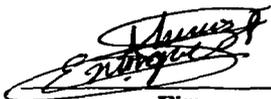
### Supervisor Técnico:

**I. Q. Héctor F. Ramírez Carrillo**

  
Firma

### Sustentante:

**Enrique Álvarez Fajardo**

  
Firma

---

## DEDICATORIAS

*Este trabajo escrito representa el logro de metas y expectativas alcanzadas con grandes esfuerzos a través de años que han compartido personas muy importantes quienes me han apoyado, a quienes se lo dedico.....*

*A mi Padre, Enrique Javier Álvarez Muñoz, quien desde niño me inculcó el deseo de estudiar como parte de mi preparación para mi vida de adulto, por su constante y valioso apoyo y el gran esfuerzo que realizó para que yo pudiera estudiar y concluir esta carrera...*

*A mi Madre, María Elena Fajardo Maldonado, quien me ha apoyado de diversas maneras, en los momentos emocionales difíciles, por cuidarme, por separarme y por el gran esfuerzo realizado durante todos estos años...*

*A mi hermana Minerva Julieta, por toda la comprensión, cariño y apoyo emocional y económico durante todos estos años de escuela y para la realización de esta tesis....*

*A mi hermana Elvia Azucena que me cuidó desde niño y me llevaba a la escuela, por todo el apoyo y cariño...*

*A mi hermano Diego Alam sobre todo por separarme, por el apoyo y por todo lo que hemos vivido y compartido juntos...*

---

*A Dr. Víctor Manuel Luna Pabello, quien ha contribuido mucho a mi formación como profesionalista, por la paciencia y por todo el apoyo recibido...*

*A M. en S. Héctor F. Ramírez Carrillo por el apoyo académico para la realización de esta tesis...*

*A las maestras Rosa María, Lupita y Lee y mis compañeros del laboratorio de Microbiología en especial a Laura, Paty, Mónica, Claudia, Rosalba, Mario y a los laboratoristas el Sr. Roberto y el Sr. Lugo...*

*A la Familia Fariás Ortiz por su hospitalidad durante más de dos años durante mis estudios...*

*A la Bióloga Susana Peralta Gómez por el apoyo y la flexibilidad para la realización de este trabajo...*

*A Melody N. Rivera Gutiérrez por el ánimo, comprensión, y su valiosa y sincera amistad...*

---

## RECONOCIMIENTOS

El presente trabajo de tesis fue desarrollado en el Laboratorio de Microbiología Experimental del Departamento de Biología de la Facultad de Química de la UNAM, bajo la dirección del Dr. Víctor Manuel Luna Pabello y contó con financiamiento parcial del PAIP 5290-12 del año 2001 y 2002.

Se agradece el apoyo económico recibido a través del Subprograma 127 "Formación Básica en Investigación" de la Coordinación de Superación Académica de la Facultad de Química, para la culminación de la presente tesis.

Se agradece al laboratorio de Ingeniería Química de la Facultad de Química de la UNAM el apoyo brindado para la molienda de los materiales utilizados en las columnas experimentales de la presente tesis.

---

# ÍNDICE

RESUMEN.....	1
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN .....	2
1.1 ESCASEZ DE AGUA .....	2
1.2 CONTAMINACIÓN DEL AGUA Y SUS EFECTOS.....	4
1.3 OBJETIVOS .....	7
CAPÍTULO 2: FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA .....	8
2.1 EL FÓSFORO.....	8
2.1.1 EL FÓSFORO Y LA CONTAMINACIÓN DEL AGUA.....	10
2.2 EL FENÓMENO DE EUTROFICACIÓN .....	11
2.3 GENERALIDADES DE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES.....	14
2.3.1 MODELO DE BALANCE DE FÓSFORO EN UN HUMEDAL ARTIFICIAL.....	16
2.4 REMOCIÓN FÍSICOQUÍMICA DEL FÓSFORO .....	17
2.4.1 REMOCIÓN CON SALES DE ALUMINIO.....	21
2.4.2 REMOCIÓN CON SALES DE HIERRO.....	21
2.4.3 REMOCIÓN CON COMPUESTOS DE CALCIO .....	22
CAPÍTULO 3: PLAN DE TRABAJO.....	26
CAPÍTULO 4: PRIMERA ETAPA EXPERIMENTAL.....	28
4.1 SELECCIÓN DEL MATERIAL DE EMPAQUE CON MEJOR REMOCIÓN DE P-PO.....	28
4.1.1 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LAS COLUMNAS EXPERIMENTALES.....	28
4.1.2 PREPARACIÓN Y ALMACENAMIENTO DEL AGUA .....	32
4.1.3 CARACTERÍSTICAS DE OPERACIÓN DE LAS COLUMNAS .....	33
4.1.4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	35

<b>4.2 EXPERIMENTOS CON EL MATERIAL DE EMPAQUE SELECCIONADO.....</b>	<b>39</b>
<b>4.2.1 PRUEBAS REMOCIÓN DE P-PO, A DIFERENTES TIEMPOS DE CONTACTO .....</b>	<b>39</b>
<b>4.2.2 PRUEBAS EN COLUMNAS CON INFLUENTE A DIFERENTES VALORES DE pH+0</b>	
<b>4.2.3 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS EN MATRACES.....</b>	<b>41</b>
<b>4.2.4 RESULTADOS DE LA EXPERIMENTACIÓN EN COLUMNAS CON INFLUENTE         A DIFERENTES VALORES DE pH.....</b>	<b>43</b>
<b>4.3 CONCLUSIONES DE LA PRIMERA ETAPA EXPERIMENTAL.....</b>	<b>47</b>
<b>CAPÍTULO 5: SEGUNDA ETAPA EXPERIMENTAL.....</b>	<b>48</b>
<b>5.1 EXPERIMENTACIÓN DE LA SEGUNDA ETAPA .....</b>	<b>48</b>
<b>5.1.1 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LAS COLUMNAS EXPERIMENTALES.....</b>	<b>48</b>
<b>5.1.2 PREPARACIÓN Y ALMACENAMIENTO DEL AGUA .....</b>	<b>49</b>
<b>5.1.3 OPERACIÓN DE LAS COLUMNAS EXPERIMENTALES.....</b>	<b>51</b>
<b>5.2 RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE LA SEGUNDA ETAPA EXPERIMENTAL.....</b>	<b>52</b>
<b>5.3 CONCLUSIONES DE LA SEGUNDA ETAPA EXPERIMENTAL .....</b>	<b>63</b>
<b>5.4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES GENERALES.....</b>	<b>64</b>
<b>CAPÍTULO 6: BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>66</b>
<b>CAPÍTULO 7: ANEXOS.....</b>	<b>72</b>
<b>ANEXO A: COLUMNAS EXPERIMENTALES DE LA SEGUNDA ETAPA .....</b>	<b>72</b>
<b>ANEXO B: ANOVA.....</b>	<b>73</b>
<b>B.1 SIMBOLOGÍA DE LOS CÁLCULOS EFECTUADOS.....</b>	<b>73</b>
<b>B.2 COMPARACIÓN DE RESULTADOS ENTRE COLUMNAS CON DIFERENTE         MATERIAL E IGUALES CONDICIONES DE OPERACIÓN.....</b>	<b>74</b>
<b>B.3 COMPARACIÓN DE RESULTADOS ENTRE COLUMNAS CON EL MISMO         MATERIAL, MISMO GASTO VOLUMÉTRICO Y DIFERENTE CONCENTRACIÓN         EN EL INFLUENTE.....</b>	<b>82</b>

---

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Concentraciones típicas de fósforo total en agua (Wang y Mitsch, 1998).....	18
Tabla 2.2 Diferentes procesos de la eliminación fisicoquímica del fósforo (Maurer y Boller 1999).....	19
Tabla 2.3 Fases minerales de fosfato de calcio.....	24
Tabla 2.4 Especies en equilibrio y constantes que se usan para calcular la supersaturación.....	25
Tabla 4.1 Materiales y herramientas necesarias para el acondicionamiento de las columnas, recipientes y agua utilizados.....	30
Tabla 4.2 Características de materiales de empaque utilizados en la primera etapa experimental.....	31
Tabla 4.3 Características de las columnas experimentales empacadas con 4 materiales diferentes.....	31
Tabla 4.4 Condiciones de operación de las columnas.....	34
Tabla 4.5 Características de la alimentación en las columnas empacadas.....	34
Tabla 4.6 Concentración (mg/L de P-PO <sub>4</sub> ) del efluente de cada columna.....	36
Tabla 4.7 Porcentaje de remoción de P-PO <sub>4</sub> en cada columna.....	37
Tabla 4.8 Valor de pH en la muestra semanal del efluente de cada columna.....	38
Tabla 4.9 Tiempos de contacto entre PIECA y la solución con P-PO <sub>4</sub> en matraces.....	40

---

<b>Tabla 4.10 Características de materiales de empaque utilizados en la experimentación con el material seleccionado.....</b>	<b>40</b>
<b>Tabla 4.11 Características del empacado de las columnas utilizadas en la experimentación con el material seleccionado.....</b>	<b>41</b>
<b>Tabla 4.12 Porcentajes de remoción de P-PO<sub>4</sub> con PIECA vs. Tiempo de contacto.....</b>	<b>42</b>
<b>Tabla 4.13 Concentración de P-PO<sub>4</sub> en la muestra semanal del efluente de cada columna.....</b>	<b>44</b>
<b>Tabla 4.14 Porcentaje de remoción de P-PO<sub>4</sub> en la muestra semanal del efluente de cada columna .....</b>	<b>44</b>
<b>Tabla 4.15 Valor de pH en la muestra semanal del efluente de cada columna .....</b>	<b>46</b>
<b>Tabla 5.1 Características de materiales de empaque utilizados en la segunda etapa experimental.....</b>	<b>49</b>
<b>Tabla 5.2 Características del empacado de las columnas utilizadas en la segunda etapa experimental.....</b>	<b>49</b>
<b>Tabla 5.3 Condiciones de operación de las columnas de la segunda etapa experimental.....</b>	<b>51</b>
<b>Tabla 5.4 Concentración de P-PO<sub>4</sub> en la muestra semanal del efluente de cada columna.....</b>	<b>52</b>
<b>Tabla 5.5 Porcentaje de remoción de P-PO<sub>4</sub> en la muestra semanal del efluente de cada columna .....</b>	<b>53</b>
<b>Tabla 5.6 Remoción total acumulada con TEMIN y PIECA.....</b>	<b>62</b>

---

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Disponibilidad de agua en el mundo (AIAD, 2003).....	3
Figura 2.1 Eutroficación de un río como consecuencia de las actividades humanas .....	13
Figura 2.2 Esquema básico de un humedal artificial (flujo horizontal) (Miranda y Luna-Pabello, 2001).....	15
Figura 2.3 Efecto de pH en la concentración de ortofosfatos en solución (Maurer y Boller, 1999).....	20
Figura 2.4 Efecto de pH en la concentración de fosfatos en solución (Jenkins y Hermanowitz, 1991).....	20
Figura 2.5 Efecto del pH en la concentración de ortofosfatos en solución.....	23
Figura 3.1 Plan de trabajo experimental .....	27
Figura 4.1 Características generales de cada columna experimental.....	29
Figura 4.2 Arreglo general de cada recipiente de almacenamiento.....	33
Figura 4.3 Concentración de P-PO <sub>4</sub> en el efluente de cada columna (Influente 22 mg/L) .....	36
Figura 4.4 Concentración de P-PO <sub>4</sub> en el efluente de cada columna.....	37
Figura 4.5 Valores de pH en el efluente de cada columna .....	38
Figura 4.6 Concentración de P-PO <sub>4</sub> vs. Tiempo de contacto .....	42
Figura 4.7 Concentración de P-PO <sub>4</sub> en la muestra semanal del efluente de cada columna.....	45

---

Figura 4.8 Porcentaje de remoción de P-PO <sub>4</sub> en el efluente de cada columna .....	45
Figura 4.9 Valores de pH de la muestra semanal del efluente de cada columna .....	46
Figura 5.1 Recipientes de almacenamiento .....	50
Figura 5.2 Concentración de P-PO <sub>4</sub> en el efluente de cada columna (influyente 20 mg/L) .....	55
Figura 5.3 Remoción de P-PO <sub>4</sub> en el efluente de cada columna (influyente 20 mg/L) .....	55
Figura 5.4 Concentración de P-PO <sub>4</sub> en el efluente de cada columna (influyente 10 mg/L) .....	57
Figura 5.5 Remoción de P-PO <sub>4</sub> en el efluente de cada columna (influyente 10 mg/L) .....	57
Figura 5.6 Concentración de P-PO <sub>4</sub> en el efluente de cada columna (influyente 5 mg/L) .....	58
Figura 5.7 Remoción de P-PO <sub>4</sub> en el efluente de cada columna (influyente 5 mg/L) .....	59
Figura 5.8 Concentración de P-PO <sub>4</sub> en el efluente de cada columna (influyente 2.5 mg/L) .....	60
Figura 5.9 Remoción de P-PO <sub>4</sub> en el efluente de cada columna (influyente 2.5 mg/L) .....	61

---

## RESUMEN

En México más del 75% de las aguas residuales son descargadas al ambiente sin tratamiento alguno (CNA, 2001). La presencia excesiva de fosfatos en estas aguas hace que la calidad del agua de los cuerpos receptores disminuya, promoviendo su eutroficación y con ello la disminución de vida silvestre acuática. En general, las plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas, actualmente construidas en México, no producen agua residual tratada acorde con los requerimientos para prevenir la eutroficación de los cuerpos acuáticos naturales receptores. El presente trabajo se enfocó a evaluar la capacidad de diferentes materiales pétreos, ampliamente distribuidos en México y económicamente accesibles, que permitan una alta eliminación de ortofosfatos ( $P-PO_4$ ) presentes tanto en aguas naturales contaminadas, como en aguas residuales parcialmente tratadas. Los experimentos se dividieron en dos etapas experimentales. En la primera, se evaluaron, en columnas a pequeña escala, los materiales PIECA, CAS, EVOL y gravilla como material de referencia, alimentadas con 22 mg/L de  $P-PO_4$ . Los mejores resultados fueron con CAS y PIECA, logrando remover más del 92% durante seis semanas. En la segunda etapa, empleando agua corriente enriquecida a 20, 10, 5 y 2.5 mg/L de  $P-PO_4$  y dos razones de carga hidráulica superficial (128 y 256  $mm^3/mm^2d$ ) se llevó a cabo la comparación de PIECA con el material denominado TEMIN, el cual tiene una probada capacidad de remoción de  $P-PO_4$ . Los mejores resultados obtenidos indican que se puede obtener una remoción superior al 99% de eliminación de  $P-PO_4$  contenidos en agua. En consecuencia ambos materiales resultan prometedores para ser empleados en el pulimento de aguas residuales susceptibles de ser descargadas en cuerpos acuáticos naturales con valores menores a 0.1 mg/L de  $P-PO_4$ .

---

## **CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN**

### **1.1 ESCASEZ DE AGUA**

El agua es un recurso indispensable para la vida y las actividades humanas, sin embargo, en todo el mundo más de mil millones de personas no tienen acceso a agua potable. Se estima que para finales del siglo, un 80% de los habitantes urbanos podrían no disponer de un suministro adecuado de agua potable.

Sólo una pequeña cantidad del agua dulce del planeta (aproximadamente el 0.008%) está actualmente disponible para el consumo humano. Un 70% de la misma se destina a la agricultura, un 23% a la industria y sólo un 8% al consumo doméstico (BCME, 2003).

Al mismo tiempo, la demanda de agua potable está aumentando rápidamente. Se espera que el consumo agrícola de agua aumente un 17% y el industrial un 60% en los próximos años. A medida que el agua potable es más escasa, hay mayores posibilidades de que se convierta en una fuente de conflictos regionales (AIAD, 2003; BCME, 2003).

El suministro de agua potable está disminuyendo debido a las fuertes sequías que la mitad de las naciones del mundo han experimentado (Figura 1.1). Como consecuencia, la población, en constante aumento, extrae agua de los acuíferos a un ritmo mayor del tiempo que tarda en reponerse por medios naturales. Además, el agua es un recurso limitado que debe cuidarse y aprovecharse adecuadamente, ya que para encontrar los mantos acuíferos y extraer el vital líquido, se requiere

de equipo especial para excavar a grandes profundidades, lo que a su vez incrementa su costo.

### Disponibilidad Hídrica Mundial

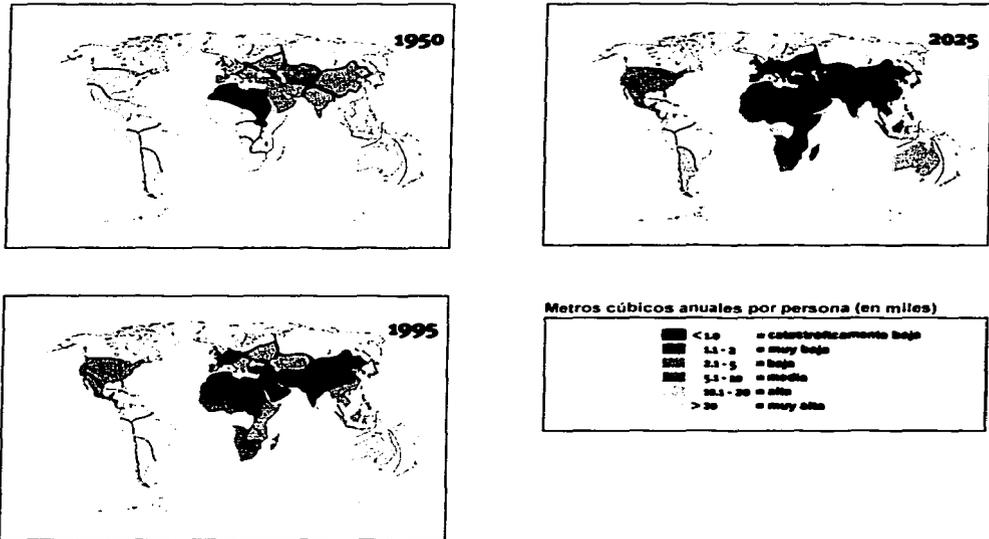


Figura 1.1 Disponibilidad de agua en el mundo (AIAD, 2003)

En México, existe deficiencia en la disponibilidad del agua a pesar de que existe suficiente volumen para satisfacer la demanda, esto debido a la distribución geográfica que provoca escasez en buena parte del territorio. Por ejemplo, en el norte del país, en una zona que abarca un área del 30% del territorio nacional, sólo se tiene un 3% del escurrimiento total. Por otro lado, la concentración de la

---

**población en grandes centros urbanos e industriales provoca sobreexplotación del recurso hídrico, así como problemas de abastecimiento.**

**La administración del agua potable genera variados dilemas de carácter político y económico. A menudo, los países en vías de desarrollo no pueden permitirse la construcción y mantenimiento en operación de costosas plantas de tratamiento de aguas residuales, como las existentes en países desarrollados.**

## **1.2 CONTAMINACIÓN DEL AGUA Y SUS EFECTOS**

**La contaminación de ríos y arroyos provocada por sustancias químicas ha sido uno de los problemas ambientales más graves tanto del siglo pasado como del presente. La contaminación química de los ríos y arroyos se divide en dos grandes grupos: contaminación puntual y no puntual. La primera procede de fuentes identificables, la “no puntual” es aquella cuyo origen no puede identificarse con precisión.**

**La contaminación industrial de las aguas subterráneas sigue siendo un grave problema en la mayoría de los países desarrollados. En todo el mundo se produce la infiltración de productos tóxicos en el suelo y mantos acuíferos, procedentes de tanques de almacenamiento de gasolina, tiraderos de basura y zonas de desechos industriales, productos químicos agrícolas y en algunas ciudades costeras, el agua del mar se introduce en el interior de los acuíferos para llenar el vacío consecuencia de la extracción para consumo humano, contaminando así el agua potable restante.**

---

**Las personas que consumen agua de fuentes contaminadas son más propensas a contraer enfermedades infecciosas y hasta mortales. Este es el principal problema de salud en países en vías de desarrollo, por lo que cada año mueren alrededor de 10 millones de personas en el mundo por beber agua contaminada (BCME, 2003).**

**Otra causa importante de la contaminación del agua potable es la descarga de aguas residuales sin tratamiento alguno. En los países en vías de desarrollo, el 95% de las aguas residuales se descargan sin ser tratadas en ríos cercanos, que a su vez suelen ser una fuente de agua potable, además, la contaminación producida por las aguas residuales mata a los peces de agua dulce, una importante fuente de alimentos, y favorece la proliferación de algas nocivas en zonas costeras.**

**En México cerca del 75% del agua residual no es sometida a ningún tipo de tratamiento (CNA, 2001). De los 1132 sistemas de tratamiento de aguas residuales que existen en México sólo cerca del 83% (938 plantas de tratamiento) se encuentran en operación, es decir que de los 80.622 m<sup>3</sup>/s de capacidad instalada únicamente se aprovecha un 63%.**

**En las aguas residuales, además de la materia orgánica y microorganismos patógenos, también se encuentran nutrimentos, compuestos cuya presencia en el agua es indeseable debido a que contribuyen significativamente al fenómeno de eutroficación de ríos, lagos y lagunas. En particular, este tipo de contaminación es la que principalmente se estimula por efecto del nitrógeno y fósforo. Los compuestos de fósforo se encuentran en los residuos de humanos, animales, plantas y en una gran cantidad de detergentes de uso doméstico que se descargan al drenaje (Welch, 1992; Ceit, 2001), así como en las aguas residuales que provienen de industrias procesadoras de alimentos, productoras de fosfatos y**

---

ácido fosfórico, de acabado de metales, así como del uso de compuestos desincrustantes e inhibidores de corrosión. Dichos compuestos provocan un fuerte crecimiento orgánico en los cuerpos de agua receptores. Las especies de que principalmente se trata son las algas, entre ellas el lirio acuático, el crecimiento de estas especies tiende a estar controlado por la disponibilidad nutrimentos como el fósforo y nitrógeno.

El fenómeno de eutroficación propicia de manera global el envejecimiento y acelera la extinción de los cuerpos acuáticos (Boon, 1985). Con la presencia de nutrimentos en suspensión aumenta la fotosíntesis y con la producción de fitoplancton el enturbiamiento del agua. Lo anterior conduce a una mayor tasa de descomposición bacteriana. Esto consume y disminuye la concentración del oxígeno disuelto a un ritmo mayor que el de reposición a partir de la atmósfera, de modo que el agua se vuelve menos habitable para los peces. Otra posible consecuencia de la eutroficación es el aumento de la presencia de cianobacterias tóxicas (Melack, 2002). Aunado a esto, el enverdecimiento del agua, su mal olor y sabor, derivados de la eutroficación, hace indispensable el uso de tratamientos más costosos que permitan obtener agua con calidad de uso potable.

En vista de la situación respecto a la obtención, disponibilidad, abastecimiento, contaminación y tratamiento del agua a escala mundial y, especialmente en México, es necesario implementar, desde el punto de vista económico, operativo y funcional, mejores sistemas tratamiento.

En los últimos 20 años, uno de los principales enfoques en la búsqueda de sistemas de tratamiento de agua residuales más económicos, ha sido encaminado al uso de humedales y marismas, los cuales presentan la particularidad de

---

purificar dichas aguas residuales de manera natural. Los gobiernos y las organizaciones ambientales de todo el mundo estudian soluciones alternas para la creciente demanda global de agua potable. Actualmente, el tratamiento de aguas residuales tiende al uso de ecotecnologías, que utilizan y/o imitan a la naturaleza, aprovechando para la depuración algunos componentes del ambiente como son las plantas, los microorganismos y el suelo (Miranda Ríos y Luna-Pabello, 2001).

En este contexto, el presente trabajo plantea el uso de diferentes materiales pétreos, ampliamente distribuidos en México y económicamente accesibles, que permitan un alto porcentaje de eliminación de fosfatos presentes en aguas naturales contaminadas y en aguas residuales domésticas parcialmente tratadas. Un resultado exitoso, permitirá fundamentar una propuesta para emplear este tipo de materiales como elementos de pulimento que complementen a los sistemas de tratamiento de aguas residuales actualmente existentes, así como la construcción de humedales artificiales que los utilicen como medio de soporte. En este sentido, se plantearon como objetivos de la presente tesis los siguientes.

### 1.3 OBJETIVOS

#### OBJETIVO GENERAL

Evaluar experimentalmente la remoción de ortofosfatos ( $P-PO_4$ ) empleando columnas a pequeña escala empacadas con diferentes materiales pétreos.

---

## **OBJETIVOS PARTICULARES**

- **Seleccionar tres materiales petreos de empaque que permitan la remoción de ortofosfatos**
- **Diseñar, construir y determinar las condiciones de operación de las columnas experimentales**
- **Evaluar, bajo condiciones experimentales predeterminadas, el porcentaje de remoción de ortofosfatos logrado en las columnas empacadas con diferentes materiales petreos**
- **Seleccionar el material que mayor remoción haya logrado y efectuar con él pruebas de remoción de ortofosfatos a diferentes tiempos de contacto y valores de pH**
- **Comparar experimentalmente el mejor material experimental determinado en este estudio con el recomendado por otros autores.**

## **CAPÍTULO 2: FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA**

### **2.1 EL FÓSFORO**

El fósforo (P) es el onceavo elemento más común en la litosfera, esencial para todos los organismos vivos y uno de los principales nutrientes de las plantas junto con el nitrógeno. En la naturaleza normalmente se encuentra combinado con oxígeno y otros elementos, formando fosfatos. El fósforo dentro de los sistemas naturales sólo entra por de la erosión de ciertas rocas y depósitos minerales formados naturalmente. En suelos es fácilmente agotado y la sustentabilidad de la agricultura tradicional depende del ciclo del fósforo.

---

En la naturaleza el fósforo se encuentra sobre todo como rocas fosfóricas, que son principalmente ortofosfato tricálcico  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ , y fluoroapatita,  $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$ , los mayores depósitos comerciales esta ubicados en Estados Unidos, China, la ex-Unión Soviética, Morocco, Finlandia, Sud África y algunas islas del Pacífico. Se estima que existen unos 40,000 millones de toneladas en reservas de rocas fosfatadas o para suplir la necesidad corriente de unos 250 años, sin embargo muchas de estas reservas abundantes no son accesibles o el material es de baja calidad (BSP, 1998). Se estima que, actualmente la producción mundial de fosfatos como  $\text{P}_2\text{O}_5$ , es de 40 millones de toneladas, procedentes del procesamiento de 140 millones de toneladas de rocas concentradas. De dicho total, se calcula que 80% de los fosfatos es usado en fertilizantes, 12% en detergentes, 5% en alimentos de animales y un 3% en usos especiales, como es el caso de alimentos y tratamientos de metales, entre otros (BSP, 1998).

Las sales del ácido fosfórico son muy poco solubles, por lo que casi siempre llegan al agua en forma de partículas. Aunque la eutroficación es un proceso natural relativamente lento, existen evidencias irrefutables de que éste fenómeno se ha incrementado debido al aporte de nutrimentos procedentes del suelo que ha sido alterado por las diversas actividades humanas (tala indiscriminada de árboles, agricultura intensiva y uso excesivo de fertilizantes). Este aumento puede catalogarse como eutroficación antropogénica. El aporte de fósforo disuelto a los lagos y ríos se incrementa por el vertimiento de aguas residuales industriales y domésticas. En este sentido, los detergentes de polifosfatos contribuyen sustancialmente a este enriquecimiento. Sólo algunos países como Holanda, Japón y Australia, realizan la recuperación y reciclado del fósforo que extraen de las aguas residuales.

---

### 2.1.1 EL FÓSFORO Y LA CONTAMINACIÓN DEL AGUA

Generalmente concentraciones totales de fósforo en exceso de 0.2 mg P/L en lagos y corrientes de agua naturales, proveen suficiente enriquecimiento de nutrimentos para que exista eutroficación (Mueller y Helsel, 1999), es decir que pérdidas pequeñas de fósforo de desde el punto de vista agrícola pueden ser significativas para el ambiente. En climas como el de México existe una gran cantidad de cuerpos superficiales naturales y artificiales tienen problemas de eutroficación.

Del total de fósforo que se halla presente en las aguas residuales que se descargan en el mundo, entre el 25 y 40% provienen de los detergentes (Brett, *et al.*, 1997). Los compuestos del fósforo que se encuentran en las aguas residuales son tanto de tipo inorgánico (ortofosfatos y polifosfatos) como orgánico.

Un coadyuvante es un componente de los detergentes sólidos. El más comúnmente empleado es el metafosfato, también llamado tripolifosfato de sodio ( $\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$ ). Prácticamente la totalidad de los procesos de fabricación de detergentes en México se apoyan en la utilización de este compuesto.

En numerosos países occidentales, se tiende a limitar el contenido de fósforo en la formulación de detergentes (Sagan, 2001). A partir de 1973, primero Canadá y luego otros países, prohibieron el uso de detergentes que tuvieran más de un 2,2% de fósforo, obligando así a usar otros quelantes con menor contenido de este elemento. Algunas legislaciones han llegado a prohibir la producción de detergentes con más de 0,5% de fósforo (Ceit, 2001).

---

En México, la legislación correspondiente es más laxa, lo que a propiciado que la presencia de fosfatos en aguas residuales llegue a valores de hasta 20 mg/L. De hecho la NOM-001-ECOL-1996, para la protección de la vida acuática en ríos establece como límite máximo permisible 10 mg/L para el promedio diario y 5 mg/L para el promedio mensual. Ambos valores, como se verá más adelante, exceden por mucho la concentración recomendable para prevenir problemas de eutroficación. En México existen cuerpos acuáticos naturales eutrofificados como es el Lago de Chapala. Al respecto, en sus sedimentos se ha detectado un constante incremento en los niveles de fósforo inorgánico. Este lago presenta una concentración de fosfatos que varía entre 0.35 y 0.40 mg/L, la cual de acuerdo con la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), supera las concentraciones máximas recomendadas por organismos internacionales la cual es de menor a 0.1 mg/L (Conabio, 2001).

## 2.2 EL FENÓMENO DE EUTROFICACIÓN

La eutroficación es el enriquecimiento de lagos, embalses, ríos y mares litorales por compuestos que son nutrientes para los vegetales, antes escasos, con el consiguiente aumento de la masa de vida vegetal acuática que dicho enriquecimiento permite mantener, provocando un fuerte crecimiento orgánico en los cuerpos de agua. Las especies principalmente involucradas son las algas, entre ellas el lirio acuático, cuyo crecimiento tiende a estar controlado por la disponibilidad de estos compuestos. Este fenómeno propicia, de manera global, el envejecimiento y extinción acelerados del cuerpo acuático (Boon, 1985).

---

**Eutrófico** significa bien nutrido o bien alimentado (del griego eú, bien, y trophé, alimentación). Los ecólogos utilizan el término para describir hábitats y comunidades relativamente productivos con buen aporte de nutrimentos, y para diferenciarlos de los oligotróficos, caracterizados por la deficiencia de nutrimentos. En 1919, el limnólogo sueco Einar Naumann caracterizó los lagos oligotróficos como reservas de agua normalmente profundas, situadas en cuencas de montaña con rocas resistentes, transparentes y con poca vida animal y vegetal en los que típicamente predominan los salmónidos (salmones y truchas). Los lagos eutróficos suelen ser poco profundos, situados muchas veces en llanuras bajas y alimentados por aguas ya alteradas por el contacto con rocas y suelos erosivos; mantienen abundante vida vegetal microscópica (sobre todo algas y cianobacterias del fitoplancton) y, a veces, están rodeados de nutridas comunidades de carrizos y plantas acuáticas sumergidas; también son comunes los peces de carne poco refinada (perca, carpa, barbo, rutilo, lucio).

Alteraciones en las entradas de fósforo a los ecosistemas acuáticos tiene efectos importantes en los ciclos químicos de otros elementos tales como el carbón, nitrógeno, azufre y hierro. Por otra parte, el enriquecimiento de fósforo reduce la relación N:P la cual puede favorecer el crecimiento de la cianobacteria fijadora de nitrógeno. Además, el aumento de la descomposición de la biomasa y la respiración propician condiciones anóxicas en el agua y esto a su vez favorece la metanogénesis, reducción de azufre, producción de amonio (Melack, 2002). Por desgracia, hay muchos ejemplos en el mundo de lagos dañados por este mecanismo. Algunos de los casos mejor documentados corresponden a Suecia (lagos Norrviken y Trummen), Europa Central (lagos de Zurich y Constanza) y Estados Unidos (lago Washington) (BCME, 2003).



**Figura 2.1 Eutrofización de un río como consecuencia de las actividades humanas**

La eutrofización puede invertirse frenando las cargas de fósforo, bien alejándolas de aguas frágiles (Mueller y Helsel, 1999), o mediante precipitación química con sales de hierro (extracción de fosfatos) en fuentes como los vertidos de aguas de alcantarillado.

Adicionalmente, en fechas recientes, se ha planteado la posibilidad de emplear sistemas de tratamiento basados en el uso de plantas vasculares tanto acuáticas como emergentes, para la reducción del nivel de contaminación de aguas residuales. Estos sistemas son conocidos como humedales artificiales. Debido a la importancia de dichos sistemas, en el marco del presente trabajo, a continuación se proporciona mayor información al respecto.

---

## 2.3 GENERALIDADES DE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES

Los denominados humedales artificiales o contruidos (conocidos en inglés como *constructed wetlands* o *reed beds treatment*) son sistemas empleados en el tratamiento de aguas residuales, estos sistemas diseñados y optimizados funcionalmente por el hombre. Poseen una alta eficiencia para remover sólidos suspendidos y contaminantes solubles en el agua, además, estos sistemas requieren bajos costos de construcción y operación en comparación con los sistemas convencionales de tratamiento, lo que los hace recomendables para implantarse en comunidades rurales pequeñas y medianas de México (Green y Upton, 1995). Sin embargo, no tienen la capacidad de remover a valores aceptables los fosfatos presentes en solución. Por este motivo, sus efluentes no cumplen con los criterios de calidad de agua para la protección de vida acuática y la prevención de la eutroficación de cuerpos acuáticos naturales y/o artificiales (Luna-Pabello *et al.*, 1997).

El medio de soporte o empaque es el que presenta el mayor efecto para la remoción de los compuestos de fósforo, los cuales son retenidos por filtración física, o por adsorción química, formando compuestos con minerales que posea el medio y que estos reaccionen con los fosfatos. Se sabe que el tipo de material de soporte provoca diferencias en la capacidad de remoción (Drizo *et al.*, 1996; Johansson, 1997). El tiempo de efectividad puede durar años o décadas. Uno de los factores clave que pueden incrementar la capacidad de remoción del fósforo es utilizar medios de soporte enriquecidos con minerales que tengan una alta afinidad con este elemento (en forma de  $\text{PO}_4^{3-}$  principalmente) y que además posean las características hidráulicas y mecánicas que se requieren en los humedales artificiales (HA).

Los mecanismos más importantes para la remoción de fosfatos en los humedales artificiales son:

1. Adsorción del lecho
2. Incorporación a la biomasa
3. Absorción-fijación por actividad de las plantas
4. Precipitación
5. Formación de compuestos complejos
6. Filtración

El proceso de depuración involucra la actividad de los siguientes componentes de un humedal:

- ◆ Las plantas
- ◆ Los microorganismos
- ◆ El medio de soporte

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

La interacción de los mismos se puede apreciar en la figura 2.2

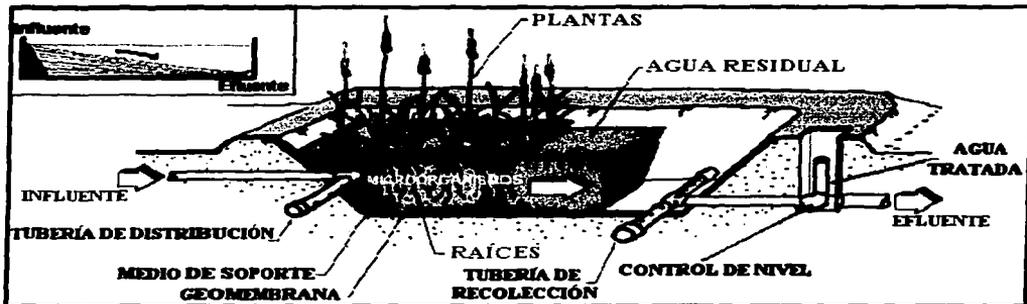


Figura 2.2 Esquema básico de un humedal artificial (flujo horizontal) (Miranda y Luna-Pabello, 2001)

---

### 2.3.1 MODELO DE BALANCE DE FÓSFORO EN UN HUMEDAL ARTIFICIAL

Se han desarrollado modelos para describir el balance de fósforo total en HA. Todos ellos están basados en la cinética que se da en un reactor continuo de tipo flujo pistón, donde se mantiene un volumen constante por medio de mantener los flujos de entrada y de salida a la misma razón. Si se considera que por sus características de flujo, el HA se describe bajo el modelo de un reactor de flujo pistón (RFP), con una cinética de primer orden, el balance de la concentración de fósforo podría ser:

Acumulación = Entrada - Salida - Transformaciones Biofísicoquímicas

O bien:

$$\frac{C_P V_P + C_M V_M + C_W V_W + (C_S + C_{IS}) \cdot V_S}{t} = (C_I Q_I + C_P Q_{IP}) - (C_E Q_E + C_P Q_{EP}) - (k_X C_X V)$$

Donde:

C = concentración de fósforo

V = volumen

Q = flujo o gasto

k = constante de reacción

Y los subíndices:

◆ P: plantas

◆ M: medio de soporte

◆ W: agua

◆ S: adsorbido

◆ IS: absorbido

◆ I: influente

◆ E: efluente

◆ IP: entra por plantas

◆ EP: sale por plantas

---

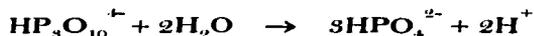
El fósforo entra al sistema y el primer efecto es la filtración y la sedimentación, del mismo que se encuentra como parte de los sólidos sedimentables y coloidales; el segundo efecto es el consumo por los microorganismos y las plantas, si está como fósforo disuelto. El siguiente efecto es la remoción química, ya sea por precipitación o por adsorción (Kadlec, 1996).

#### 2.4 REMOCIÓN FÍSICOQUÍMICA DEL FÓSFORO

En su mayoría las plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas, actualmente construidas en México (lodos activados, biofiltros y biodiscos) presentan deficiencias para remover compuestos asociados al fósforo. Sólo aquellos sistemas como los de tipo fisicoquímico son capaces de retenerlo con una eficiencia por encima del 60%, pero su inconveniente es que son procesos que requieren costos de operación elevados y generan lodos, los cuales, a su vez, demandan sistemas alternos para su tratamiento (Cooper *et al.*, 1996; Suzuki *et al.*, 1988).

En los drenajes domésticos sin tratar los fosfatos se distribuyen aproximadamente en la siguiente forma: ortofósforo (5 mg/L como fósforo), tripolifósforo (3 mg/L como fósforo), pirofosfato (1 mg/L como fósforo) y fosfatos orgánicos (< 1 mg/L como fósforo), en la tabla 2.1 se muestran las concentraciones que se pueden encontrar según el tipo de agua. Sin embargo, en el agua, los polifosfatos son inestables y eventualmente se convierten en ortofosfatos, además el tratamiento biológico secundario y un contacto prolongado con los microorganismos aseguran la hidrólisis (reversión) de los fosfatos condensados a ortofosfatos.

Por ejemplo, el tripolifosfato se hidroliza en la siguiente forma:



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Tabla 2.1 Concentraciones típicas de fósforo total en agua (Wang y Mitsch, 1998)

Tipo de aguas	Concentración de P-PO <sub>4</sub> (mg/L)
Drenaje doméstico	3-20 mg/L como P
Drenaje agrícola	0.05-1 mg/L como P
Agua superficial de lago	0.01-0.04 mg/L como P

En las plantas de tratamiento de aguas residuales la remoción fisicoquímica de fósforo consiste en: 1) transferir los ortofosfatos disueltos a partículas de mayor tamaño producidas por precipitación química, formando así compuestos de baja solubilidad por la adición de sales de hierro, aluminio o calcio. 2) los precipitados formados son comúnmente removidos por procesos de separación de sólidos tales como la sedimentación, flotación o filtración, aplicados usualmente en los tratamientos de aguas residuales (Maurer y Boller 1999).

En el proceso de remoción y en la concentración de fósforo en el efluente afectan muchos parámetros, tales como: especies químicas de los compuestos de fósforo, el pH, sólidos suspendidos, compuestos orgánicos solubles, tipo y dosis de precipitantes así como condiciones de mezclado.

En la remoción por precipitación química de ortofosfatos, el fósforo se puede remover por precipitación y floculación como se muestra en la tabla 2.2, los polifosfatos y fósforo orgánico pueden tomar parte en las reacciones de adsorción pero sólo de manera limitada.

Tabla 2.2 Diferentes procesos de la eliminación fisicoquímica del fósforo (Maurer y Boller 1999)

<b>Mecanismos de transformación de fósforo disuelto y partículas coloidales finas a partículas de mayor tamaño</b>	
Precipitación química	Formación de complejos hidroximetálicos de fósforo por ejemplo $\text{Fe}(\text{PO}_4)_x(\text{OH})_{3-3x}(\text{H}_2\text{O})$
Adsorción específica	Adsorción selectiva de fosfatos en precipitados hidroximetálicos.
Coagulación	Desestabilización de P contenido en coloide por disolución polinuclear con complejos hidroximetálicos y aglomeración en floculos separables.



<b>Separación de las partículas que contienen el fósforo</b>
Flotación de sólidos suspendidos $> 50 \text{ g} / \text{m}^3$
Filtración de sólidos suspendidos $5-50 \text{ g} / \text{m}^3$



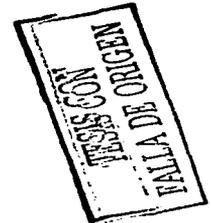
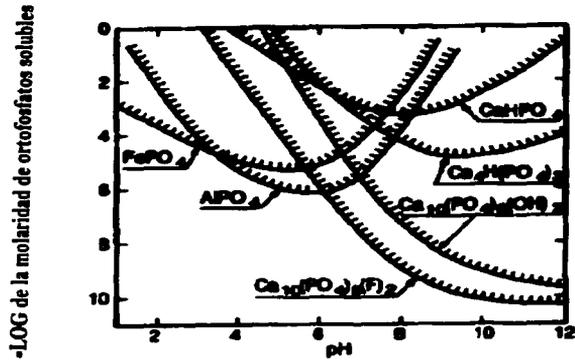


Figura 2.3 Efecto de pH en la concentración de ortofosfatos en solución (Maurer y Boller, 1999)

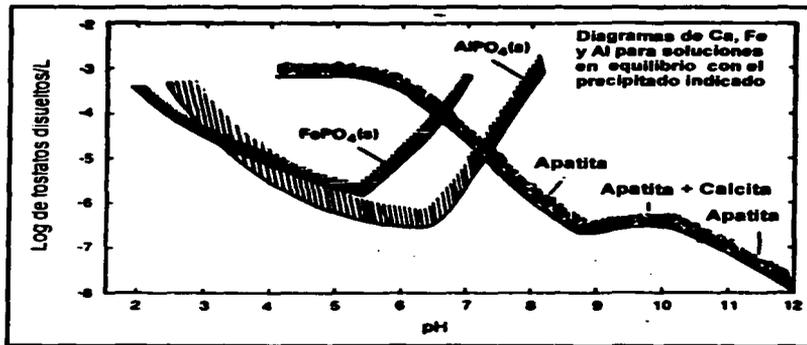
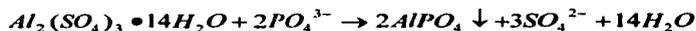


Figura 2.4 Efecto de pH en la concentración de fosfatos en solución (Jenkins y Hermanowitz, 1991)

---

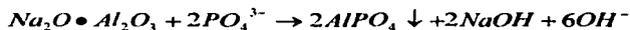
#### 2.4.1 REMOCIÓN CON SALES DE ALUMINIO

De los compuestos de aluminio, el sulfato de aluminio (Alúmina) es el compuesto más usado para la remoción, la reacción con los ortofosfatos es la siguiente:



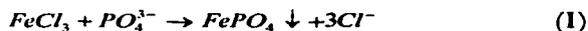
Por reacciones competitivas y dependiendo de las características del agua residual, es necesaria una cantidad mayor de sulfato de aluminio a la requerida estequiométricamente, en la reacción mostrada arriba el valor de pH óptimo está limitado a un intervalo entre 5.5 y 6.5 (Ver gráfica 2.3).

Cuando la alcalinidad es baja también podría utilizarse el aluminato de sodio, esto debido a que uno de los productos de la reacción es hidróxido de sodio (Henze *et al.*, 1996).



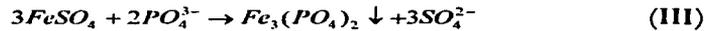
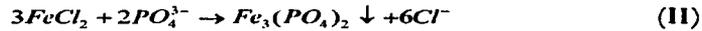
#### 2.4.2 REMOCIÓN CON SALES DE HIERRO

Las sales de hierro, tanto ferrosas Fe(II) como férricas Fe(III), pueden ser usadas para remover ortofosfatos, estas son usadas en forma de cloruros y sulfatos. La representación típica de la reacción entre el cloruro férrico y ortofosfatos es la siguiente:



---

La relación molar de Fe:P es 1:1 y 163.3 g de FeCl<sub>3</sub> reaccionan con 95 g de PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>, para formar 150.8 g de FePO<sub>4</sub>. La relación en peso de Fe:P es 1.8:1, mientras que la relación en peso del FeCl<sub>3</sub>:P es 5.2:1. Las reacciones de sales ferrosas y fósforo son las siguientes:



La relación molar de Fe:P es 3:2, mientras que la relación en peso del ión ferroso y fósforo es 2.7:1.

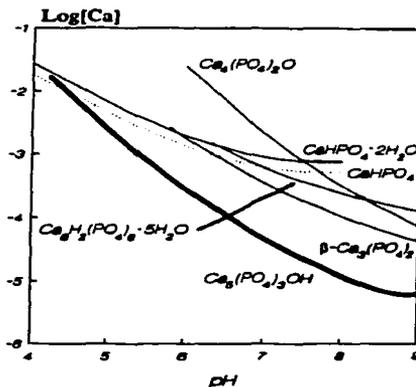
La precipitación con sales de hierro es mejor en cierto intervalo de pH, para el ión férrico el intervalo óptimo de pH es de 4.5 a 5.0 (gráfica 2.3), sin embargo se puede llevar a cabo una remoción significativa de ortofosfatos a un pH mayor, usualmente con un valor superior a 7.0. Para el ión ferroso el pH óptimo es alrededor de 8, mientras que se pueden obtener buenas tazas de remoción con valores entre 7.0 y 8.0 (Suschka *et al.* 2001; Recht y Ghassemi 1970, en: Maurer y Boller 1999). La precipitación con el ión férrico es más efectiva debido a que se puede usar en condiciones anaeróbicas, en condiciones aeróbicas los iones ferrosos probablemente son oxidados a iones férricos.

#### 2.4.3 REMOCIÓN CON COMPUESTOS DE CALCIO

En los últimos años en han emprendido investigaciones mundiales en tecnologías de remoción y recuperación de fósforo de aguas residuales.

La utilización de compuestos de calcio para remover fósforo como fosfatos de calcio es prometedora, ya que se puede inducir la formación con altas concentraciones de calcio y valores altos de pH (Liu *et al.*, 1999)

En la figura 2.5 se observa como afecta el pH de la solución a la concentración de ortofosfatos solubles en las reacciones de precipitación de compuestos de Ca.



TESIS CON  
PARTIDA DE ORIGEN  
PAZ.

Figura 2.5 Efecto del pH en la concentración de ortofosfatos en solución

Los diferentes compuestos (fases minerales) de fosfato de calcio que se pueden precipitar de las soluciones saturadas se muestran en la tabla 2.3.

Tabla 2.3 Fases minerales de fosfato de calcio

Formula (Fase mineral)	Nombre del compuesto	Relación Ca/P
$\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Fosfato dicálcico dihidratado	1.0
$\alpha\text{-}, \beta\text{-Ca}_3(\text{PO}_4)_2$	Fosfato tricálcico	1.5
$\text{Ca}_4(\text{PO}_4)_2\text{O}(4\text{CaO} \cdot \text{P}_2\text{O}_5)$	Fosfato tetracálcico	2.0
$2\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	Fosfato monocálcico monohidratado	0.5
$\text{CaHPO}_4$	Fosfato dicálcico	1.0
$z\text{Ca}_y(\text{PO}_4)_n \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	Fosfato de calcio amorfo	1.5
$2\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$	Fosfato monocálcico	0.5
$z2\text{Ca}_y(\text{HPO}_4)_n(\text{PO}_4)_5\text{OH}$ , $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$	Hidróxiapatita	5-1.67
$\text{Ca}_8\text{H}_2(\text{PO}_4)_6 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	Fosfato octacálcico	1.33

La supersaturación (S) de un sistema con respecto a una fase dada de fosfato de calcio indica termodinámicamente la tendencia de la precipitación de la reacción (Song *et al.*, 2001). Esta se define como:

$$S = \frac{\text{Producto de actividad iónica en solución (IP)}}{\text{Producto de solubilidad (Kps)}}$$

Donde los IP's de fosfatos de calcio se definen como sigue:

$$\text{IP}_{\text{HAP}} = ([\text{Ca}^{2+}]f_2)^5([\text{PO}_4^{3-}]f_3)^3(K_w/[\text{H}^+])f_1$$

$$\text{IP}_{\text{OCP}} = ([\text{Ca}^{2+}]f_2)^4([\text{PO}_4^{3-}]f_3)^3[\text{H}^+]f_1$$

$$\text{IP}_{\text{TCP}} = ([\text{Ca}^{2+}]f_2)^3([\text{PO}_4^{3-}]f_3)^2$$

$$\text{IP}_{\text{DCPD}} = [\text{Ca}^{2+}]f_2[\text{HPO}_4^{2-}]f_2$$

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Un índice de saturación (SI) es definido como:  $\text{SI} = \log(S)$

El cálculo del producto de actividad iónica requiere de un detallado conocimiento de las naturaleza química de los iones en la solución. Los coeficientes de actividad se pueden calcular de acuerdo a la ecuación de Davies:

$$\log f_z = AZ^2 \{ I^{1/2} / (1 + I^{1/2}) - 0.31 \}$$

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

**Tabla 2.4** Especies en equilibrio y constantes que se usan para calcular la supersaturación

Equilibrio	pK
$H_3PO_4 \leftrightarrow H_2PO_4^- + H^+$	$pK = 799.31/T - 4.5535 + 0.013486T$
$H_2PO_4^- \leftrightarrow HPO_4^{2-} + H^+$	$pK = 1979.5/T - 5.3541 + 0.019840T$
$HPO_4^{2-} \leftrightarrow PO_4^{3-} + H^+$	$pK = 12.42 \pm 0.010$ a 20°C
$H_2O \leftrightarrow H^+ + OH^-$	$pK_w = 4471.33/T + 0.017053T - 6.0846$
$Ca^{2+} + PO_4^{3-} \leftrightarrow CaPO_4^-$	$pK = -6.462$ a 25°C
$Ca^{2+} + HPO_4^{2-} \leftrightarrow CaHPO_4^0$	$pK = 148.15 - 22188/T - 0.2554T$
$Ca^{2+} + H_2PO_4^- \leftrightarrow CaH_2PO_4^+$	$pK = 53.335 - 8413.5/T - 0.08660T$
$Ca^{2+} + OH^- \leftrightarrow CaOH^+$	$pK = -1.356$
$Ca_5(PO_4)_3OH(s) \leftrightarrow 5Ca^{2+} + 3PO_4^{3-} + OH^-$	$pK_{HAP} = 8219.41/T + 1.6657 + 0.098215T$
$Ca_4H(PO_4)_3 \cdot 3H_2O(s) \leftrightarrow 4Ca^{2+} + 3PO_4^{3-} + H^+ + 3H_2O$	$pK_{FOC} = 50.606$ a 20°C
$Ca_3(PO_4)_2(s) \leftrightarrow 3Ca^{2+} + 2PO_4^{3-}$	$pK_{TFC} = 45723.26/T - 287.4536 + 0.546763T$
$CaHPO_4 \cdot 2H_2O(s) \leftrightarrow Ca^{2+} + HPO_4^{2-} + 2H_2O$	$pK_{DFCD} = 3649.6/T - 18.181 + 0.04203T$

Donde T es la temperatura en (K),  $K_w$  es el producto iónico del agua, además  $K_{HAP}$ ,  $K_{OCP}$ ,  $K_{TCP}$ , y  $K_{DCPD}$  son los productos de solubilidad para la hidróxiapatita (HAP), fosfato octacálcico (FOC), fosfato tricálcico (TFC), fosfato dicálcico dihidratado (DFCD), respectivamente ( $pK = -\log_{10}K$ ).

---

### **CAPÍTULO 3: PLAN DE TRABAJO**

Este trabajo experimental consta de 2 etapas, en la primera etapa se evaluó la remoción de ortofosfatos en columnas empacadas con 4 materiales pétreos diferentes: piedra caliza (PIECA), cascajo (CAS), escoria volcánica (EVOL), terrero de mina (TEMIN) y gravilla.

Con base en la remoción, las características y abundancia del material, se seleccionó el más promisorio, que resultó ser la PIECA, posteriormente se evaluó la remoción de ortofosfatos en matraces Erlenmeyer a diferentes tiempos de contacto con este material y por último, se evaluó la remoción de ortofosfatos en columnas empacadas y diferentes valores de pH en el influente.

En la segunda etapa experimental, se realizó la evaluación comparativa de la remoción de P-PO<sub>4</sub>, lograda por la PIECA respecto al TEMIN, el cual es un material pétreo estudiado paralelamente por otros autores y que fue seleccionado para realizar la evaluación comparativa, por su alta capacidad para eliminar fosfatos (Ksoll, 2002). En el siguiente diagrama de flujo se muestra el plan de trabajo experimental.

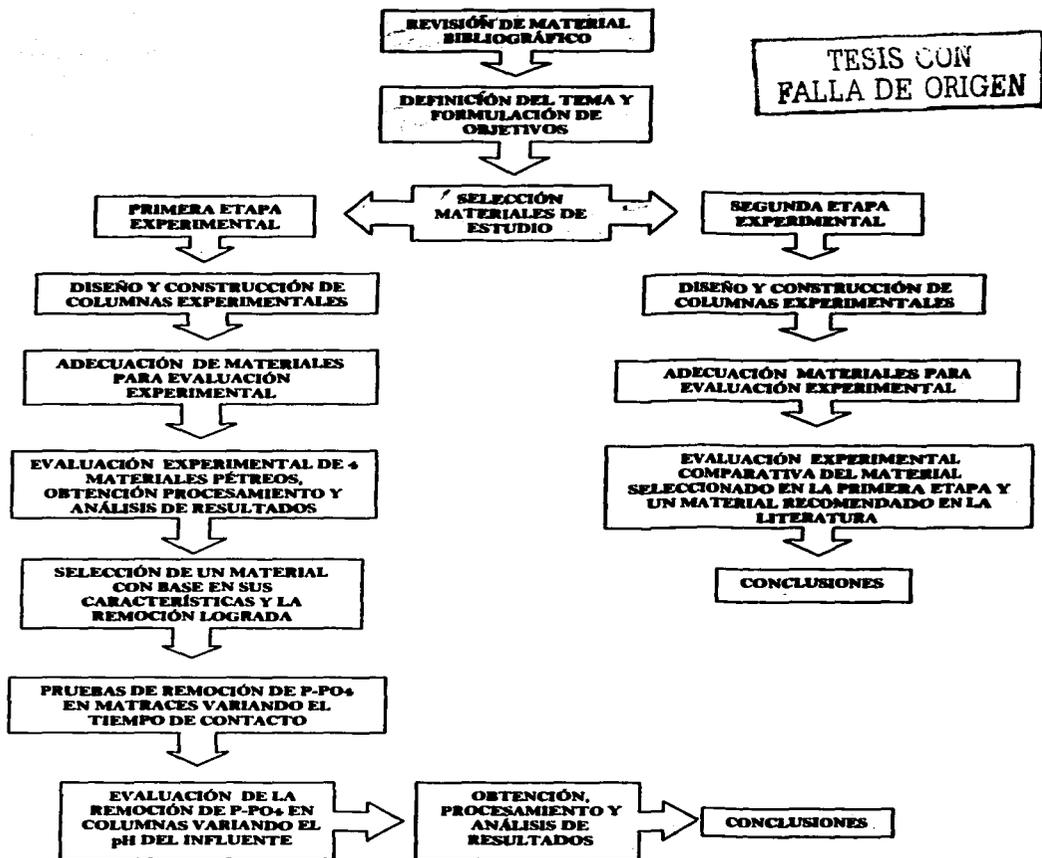


Figura 3.1 Plan de trabajo experimental

---

## **CAPÍTULO 4: PRIMERA ETAPA EXPERIMENTAL**

### **4.1 SELECCIÓN DEL MATERIAL DE EMPAQUE CON MEJOR REMOCIÓN DE P-PO<sub>4</sub>**

- Construcción y empaqueo de columnas con 4 diferentes materiales pétreos, PIECA, EVOL, CAS y gravilla.
- Molienda y tamizado de los materiales de empaque.
- Preparación de un lote de agua proveniente de la planta de tratamiento de aguas residuales de C.U., tomada a la salida del sedimentador posterior al tratamiento biológico secundario, el lote de agua fue enriquecido con sales de fosfato de potasio (KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>) hasta alcanzar una composición uniforme de 22 mg/L (Ramírez-Carrillo *et al.*, 1997).
- Evaluación experimental, obtención, procesamiento y análisis de resultados.
- Selección del material que tenga la mejor capacidad de remoción y características.

#### **4.1.1 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LAS COLUMNAS EXPERIMENTALES**

Para la ejecución del trabajo experimental, se construyeron columnas de PVC, simulando una fracción longitudinal de la estructura típica de HA, El empaque se efectuó según las normas establecidas para el arreglo de perfiles de la zona del

lecho en HA (ÖNORM 1995.ÖN B 2505; Crites, 1994) con objeto de lograr su óptimo funcionamiento (Figura 4.1).

El diseño se basa en una relación radio/longitud de un reactor cilíndrico que se ubica entre los valores comprendidos de 1/8 a 1/10 (en el caso de las columnas su razón radio/longitud del soporte fue de 1/8, en reactores empacados la relación tamaño de partícula/diámetro de columna debe ser mayor a 1/15 (las columnas fueron diseñadas a una razón aproximada de 1/50) para asegurar una adecuada distribución del fluido en su superficie (Bosworth, 1996; Walas, 1992; Brix *et. al*, 2001).

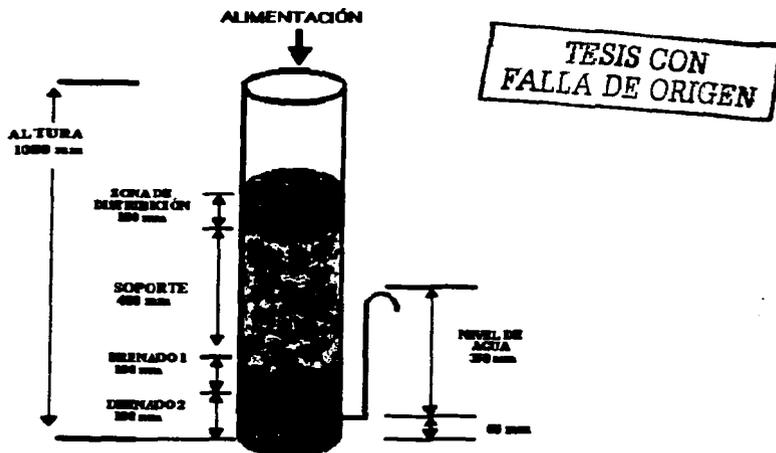


Figura 4.1 Características generales de cada columna experimental

Los materiales utilizados como medio de soporte en humedales artificiales requieren ciertas características para el adecuado funcionamiento, tales como la composición, porosidad y conductividad hidráulica. En este caso, la composición es una característica muy importante para lograr los objetivos, ya que para remover los ortofosfatos del agua se requieren minerales capaces de adsorberlos y/o precipitarlos.

Por otro lado se recomienda que el material de empaque tenga una porosidad mayor al 30% (Kivaisi, 2001), una conductividad hidráulica con un valor entre  $1 \times 10^{-4}$  y  $1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{m}^2\text{s}$ , estas últimas (la porosidad y la conductividad hidráulica) dependen del diámetro de partícula (Boon,1985; EC/EWPCA,1990), para la eliminación de ortofosfatos con medios de soporte minerales se recomienda un diámetro de partícula entre 0.2 y 3 mm (en las columnas se utilizó un tamaño entre 2 y 3 mm) (EPA, 1999; Tanner *et al.* 1998; Brix *et al.*, 2001).

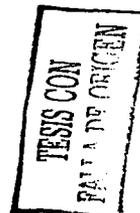
Tabla 4.1 Materiales y herramientas necesarias para el acondicionamiento de las columnas, recipientes y agua utilizados

Materiales	Herramienta	Equipo
Tubo y coples de PVC (100mm y 25mm)	Arco con segueta	Molino de minerales
Tapones macho de PVC (100 mm)	Espátula	Tamizador
Tapones capa (25 mm)	Pinzas de electricista	Autoclaves
Tinas y cubetas tinas de polietileno	Lijas	
Manguera de 4 y 25 mm	Martillo	
Pegamento para PVC	Pinzas de mecánico	
Silicón	Taladro	
Garrafrones (60 y 100 L)		
3 llaves de nariz		
PIECA: 100kg)		
CAS: 25kg		
Gravilla: 30kg		
TEMIN 20kg		

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

**Tabla 4.2 Características de materiales de empaque utilizados en la primera etapa experimental**

Tipo de material	Diámetro de partícula (mm)	Volumen total (L)	Peso aprox. (kg)
PIECA (1er. lote)	2 - 3	3.2	5
CAS	2 - 3	3.2	5
EVOL	2 - 3	3.2	5
Gravilla	2 - 3	3.2	5
Gravilla	4.0-8.0	18	25
Gravilla	8.0-12.0	12	20



Nota: Los volúmenes señalados en las tablas 1 y 2 no toman en cuenta la porosidad del material, la densidad de los materiales de soporte es entre 1.5 y 2.5 g/mL.

**Tabla 4.3 Características de las columnas experimentales empacadas con 4 materiales diferentes**

Tipo de horizonte	Tipo de material	Diámetro de partícula (mm)	Longitud (mm)	Número de columnas
Soporte	CAS	2 - 3	400	1
Soporte	PIECA	2 - 3	400	1
Soporte	EVOL	2 - 3	400	1
Soporte	Gravilla	2 - 3	400	1
Zona distribución	Gravilla	4.0-8.0	100	4
Drenado 1	Gravilla	4.0-8.0	50	4
Drenado 2	Gravilla	8.0-12.0	100	4

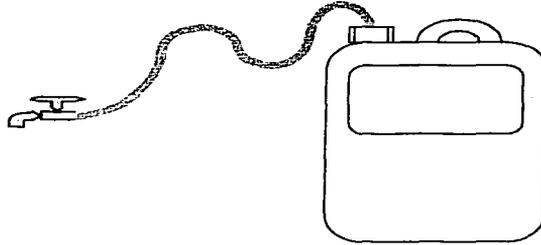
---

#### 4.1.2 PREPARACIÓN Y ALMACENAMIENTO DEL AGUA

Para el desarrollo del experimento se utilizó un solo lote de agua en cada etapa, proveniente de la planta de tratamiento de aguas residuales de Ciudad Universitaria. Este lote se tomó del efluente que proviene del tratamiento biológico secundario (APHA, 1998).

- Se esterilizó el agua residual con la finalidad de reducir la carga microbiana para lo cual se usaron tres autoclaves con recipientes de 20 L cada una para realizar la esterilización, de acuerdo al procedimiento para el manejo de este equipo.
- Para el almacenamiento del agua se utilizaron 4 recipientes, los cuales se lavaron con una solución desinfectante, a razón de una parte de esta sustancia por diez partes de agua destilada.
- El agua se almacenó en el cuarto de refrigeración a 4 °C.
- Se determinó la concentración de P-PO<sub>4</sub> del lote de agua, y se enriqueció hasta alcanzar un valor de 22 mg/L de P-PO<sub>4</sub> (Ramírez-Carrillo *et al.*, 1997), para verificar que efectivamente se tenga dicha concentración se llevó a cabo la determinación de P-PO<sub>4</sub> (APHA, 1998).

Respecto a los recipientes de almacenamiento, fue necesario adecuar sus boquillas colocando tapones acondicionados con manguera para la toma del agua de alimentación (Figura 4.2), fue importante colocar la manguera de toma de agua en forma de serpiente, para evitar al máximo la entrada de microorganismos.



**Figura 4.2 Arreglo general de cada recipiente de almacenamiento**

#### **4.1.3 CARACTERÍSTICAS DE OPERACIÓN DE LAS COLUMNAS**

- Las columnas se alimentaron con 2 dosis diarias de agua de 500 mL, cada una. La primera a las 9:00 h y la segunda a las 17:00 h, de lunes a viernes, la razón de carga hidráulica superficial (RCHS) de 127 mm/d (equivalente a una carga volumétrica de  $0.318\text{mm}^3/\text{mm}^2\text{d}$ ), la cual representa un valor 10 veces mayor a la carga propuesto para la operación de humedales de flujo vertical (HAFV).
- Durante la toma del agua de alimentación de los recipientes, se preparó una pequeña área estéril con un mechero lo más cerca posible de la llave, con el fin de evitar al máximo la entrada de microorganismos. Asimismo, antes de dicha toma, fue necesario homogeneizar el contenido.

- La toma de muestras se llevó a cabo cada viernes. Se colectarán 500 mL de efluente por columna.
- La colecta de las muestras se realizó justo después de que se hizo la primera alimentación del día.
- Los parámetros que se midieron a las muestras fueron: concentración de P-PO<sub>4</sub> y pH (APHA, 1998).

Tabla 4.4 Condiciones de operación de las columnas

Flujo de alimentación	1000 mL/d (2 dosis de 500 mL cada una)
Concentración de PO <sub>4</sub>	22 mg/L
Razón de carga hidráulica	127 mm/día
Duración de la experimentación con 4 materiales	6 semanas
Duración de la experimentación con PIECA	10 semanas

Tabla 4.5 Características de la alimentación en las columnas empacadas

Número de columna	Material de empaque (2 a 3 mm de diámetro)	Características del influente
1	PIECA	Agua tratada esterilizada, pH sin modificar
2	PIECA	Agua tratada esterilizada, pH=9
3	PIECA	Agua tratada esterilizada, pH=10
4	PIECA (testigo)	Agua destilada pH sin modificar
5	Gravilla (testigo)	Agua tratada esterilizada, pH sin modificar

TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN

---

#### 4.1.4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta primera etapa en la que se evaluó la remoción de P-PO<sub>4</sub> con cuatro materiales, los mejores resultados se obtuvieron con CAS y PIECA logrando una concentración final en promedio de  $1.66 \pm 0.22$  y  $1.70 \pm 0.5$  mg/L de P-PO<sub>4</sub>, respectivamente, siendo menor la concentración en el efluente de la columna con PIECA que con la de CAS durante las dos primeras semanas (Tabla 4.6) y ligeramente menor con CAS en el resto de la prueba (Figura 4.3).

En el caso de EVOL la concentración obtenida en la primera semana fue de 8.5 y la última de 11.86 mg/L de P-PO<sub>4</sub>, el material de referencia que fue la gravilla tuvo resultados acordes a los reportados en la literatura (Johansson, 1997), logrando una concentración en la primera semana de 11.79 y de 13.54 mg/L en la última.

El CAS utilizado contiene 3 elementos que reaccionan con los ortofosfatos, como son el Al, Fe y Ca, por otra parte la PIECA utilizada (1er. lote) tiene un contenido de CaCO<sub>3</sub> arriba del 75%, de ahí que el porcentaje de remoción que presentaron tanto CAS como PIECA fue mayor al 90% en todas las semanas (Tabla 4.7), además la tendencia en la remoción que se observa en la figura 4.4 muestra que estos dos materiales no se agotaron. Por otro lado la gravilla y EVOL presentan remociones cercanas al 40 y 50% respectivamente, con una disminución notable en la remoción a través de la experimentación.

En cuanto al valor del pH, los efluentes de las columnas con PIECA y CAS aumentaron a valores cercanos a 9 (Tabla 4.8), esto es debido a los compuestos de calcio que le confieren al agua propiedades alcalinas, mientras que en los efluentes

de las otras dos columnas (EVOL y Gravilla) el valor del pH disminuyó ligeramente, con valores que se mantuvieron cercanos a 7 (Figura 4.5).

Con base en los resultados obtenidos en esta etapa, se concluye que el material más adecuado para llevar a cabo la siguiente fase experimental es PIECA, debido a la remoción, disponibilidad y composición.

Tabla 4.6 Concentración (mg/L de P-PO<sub>4</sub>) del efluente de cada columna

Semana	Columna 1 (CAS)	Columna 2 (PIECA)	Columna 3 (EVOL)	Columna 4 (Gravilla)
1	1.30	0.98	8.50	11.79
2	1.52	1.15	9.81	12.06
3	1.84	2.14	11.05	12.27
4	1.74	2.03	11.82	13.43
5	1.88	1.99	11.84	13.51
6	1.69	1.91	11.86	13.54

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

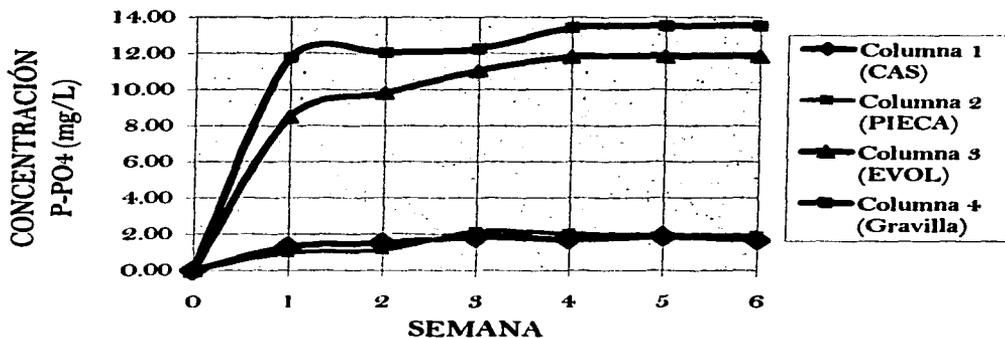


Figura 4.3 Concentración de P-PO<sub>4</sub> en el efluente de cada columna (Influente 22 mg/L)

Tabla 4.7 Porcentaje de remoción de P-PO<sub>4</sub> en cada columna.

Semana	Columna 1 (CAS)	Columna 2 (PIECA)	Columna 3 (EVOL)	Columna 4 (Gravilla)
1	94.21	95.61	56.40	47.57
2	93.21	94.87	56.40	46.35
3	91.82	90.45	50.90	45.40
4	92.24	90.95	47.50	40.27
5	91.64	91.11	47.40	39.88
6	92.47	91.50	47.33	39.79

TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN

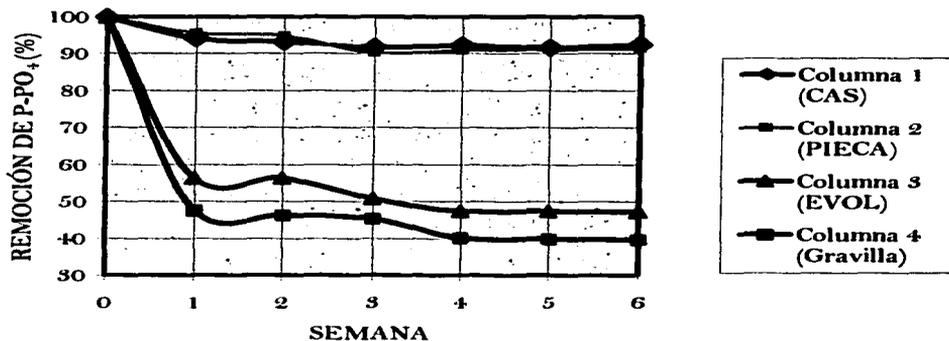
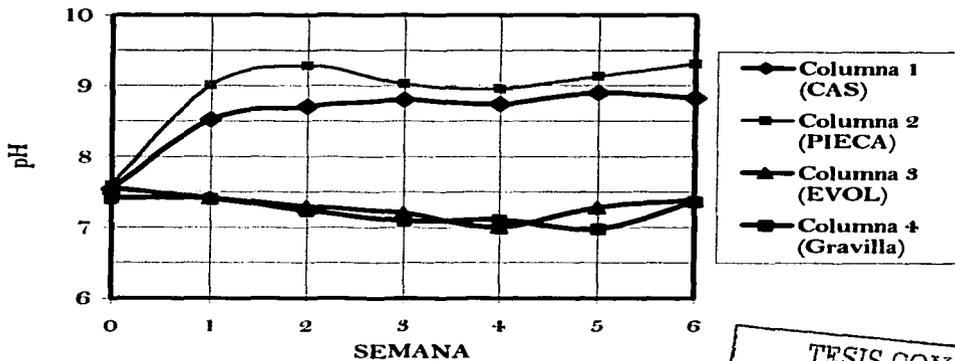


Figura 4.4 Concentración de P-PO<sub>4</sub> en el efluente de cada columna

Tabla 4.8 Valor de pH en la muestra semanal del efluente de cada columna

Semana	Columna 1 (CAS)	Columna 2 (PIECA)	Columna 3 (EVOL)	Columna 4 (Gravilla)
0	7.54	7.60	7.56	7.42
1	8.52	9.01	7.42	7.41
2	8.71	9.29	7.30	7.24
3	8.80	9.03	7.21	7.10
4	8.74	8.96	7.01	7.11
5	8.90	9.14	7.28	6.98
6	8.83	9.31	7.39	7.37



TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Figura 4.5 Valores de pH en el efluente de cada columna

---

## **4.2 EXPERIMENTOS CON EL MATERIAL DE EMPAQUE SELECCIONADO**

Considerando que PIECA resultó ser el material más adecuado para la realización de esta etapa experimental, se plantearon las siguientes actividades:

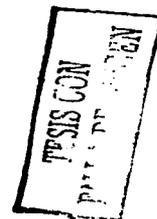
- Pruebas de remoción de  $P-PO_4$ , en matraces a diferente tiempo de contacto.
- Construcción de 5 columnas experimentales, 4 empacadas con el material seleccionado y 1 con gravilla como testigo.
- La preparación del agua para alimentación de las columnas.
- Evaluación experimental en columnas con influente a diferentes valores de pH.
- Obtención, procesamiento y análisis de resultados.

### **4.2.1 PRUEBAS REMOCIÓN DE $P-PO_4$ A DIFERENTES TIEMPOS DE CONTACTO**

Para conocer el tiempo de contacto necesario para efectuarse la remoción de  $P-PO_4$  con PIECA, se realizó la siguiente experimentación en matraces Erlenmeyer de 200 mL, se agregaron 150 g de PIECA previamente triturada y tamizada con un tamaño de partícula entre 2 y 3 mm de diámetro, se adicionaron 50 mL de una solución de  $P-PO_4$  [22 mg/L] hasta cubrir por completo el material en cada matraz, con los tiempos de contacto que se muestran en la tabla 4.9, y finalmente se filtró el agua después de cumplir con el tiempo de contacto y se midió la concentración de  $P-PO_4$  de la solución de cada matraz con el método del Vanadato-Molibdato (APHA, 1998).

Tabla 4.9 Tiempos de contacto entre PIECA y la solución con P-PO<sub>4</sub> en matraces

Matraz	Tiempo de reacción (minutos)
1	0
2	30
3	60
4	135
5	270
6	540
7	1440



#### 4.2.2 PRUEBAS EN COLUMNAS CON INFLUENTE A DIFERENTES VALORES DE pH

En la tabla 4.10 se muestra la cantidad y el tamaño de materiales utilizados para el empaque de las columnas experimentales.

Tabla 4.10 Características de materiales de empaque utilizados en la experimentación con el material seleccionado

Tipo de material	Diámetro de partícula (mm)	Volumen total (L)	Peso aprox. (kg)
PIECA (2o. lote)	2 - 3	19.2	50
Gravilla	2 - 3	12.8	25
Gravilla	4.0-8.0	18	25
Gravilla	8.0-12.0	12	20

En la tabla 4.11 se muestran las siguientes características de empaque de una columna experimental como son: longitud, tamaño de partícula y material.

Tabla 4.11 Características del empaquetado de las columnas utilizadas en la experimentación con el material seleccionado

Tipo de Horizonte	Material	Diámetro de Partícula (mm)	Longitud (mm)	Núm. de columnas
Soporte	PIECA	2 - 3	400	4
Soporte	Gravilla	2 - 3	400	1
Zona de distribución	Gravilla	4.0 - 8.0	100	5
Drenado 1	Gravilla	4.0 - 8.0	50	5
Drenado 2	Gravilla	8.0 - 12.0	100	5

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

#### 4.2.3 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS EN MATRACES

En la tabla 4.12 se presentan los porcentajes obtenidos en la experimentación a diferentes tiempos de contacto entre PIECA y el P-PO<sub>4</sub> en solución, es interesante que en los primeros 30 minutos de contacto se obtuvo 69.1% de remoción y a los 1440 minutos el 94.6%, sin embargo en la figura 4.6 se puede apreciar que en los primeros 120 minutos de contacto se presenta la mayor rapidez en la remoción de P-PO<sub>4</sub>, ya que en este lapso de tiempo la concentración de P-PO<sub>4</sub> en la solución disminuye por debajo de 3 mg/L, en el resto del tiempo sigue existiendo una disminución lenta y la curva tiende a volverse asintótica (Figura 4.6).

Tabla 4.12 Porcentajes de remoción de P-PO<sub>4</sub> con PIECA vs. Tiempo de contacto

Tiempo de reacción (minutos)	Concentración de P- PO <sub>4</sub> (mg/L)	Remoción acumulada de P- PO <sub>4</sub> (%)	Incremento relativo
0	22	0.0	0.0
30	6.8	69.1	69.1
60	4.7	78.7	9.6
135	2.7	87.7	9.0
270	2.6	88.2	1.5
540	2.0	90.9	2.7
1440	1.2	94.6	3.7

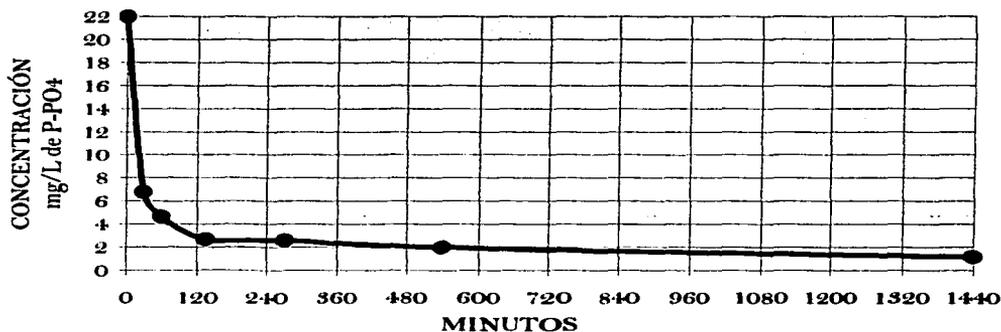


Figura 4.6 Concentración de P-PO<sub>4</sub> vs. Tiempo de contacto

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

---

#### **4.2.4 RESULTADOS DE LA EXPERIMENTACIÓN EN COLUMNAS CON INFLUENTE A DIFERENTES VALORES DE pH**

En la tabla 4.13 se muestran las concentraciones obtenidas en los efluentes de las columnas experimentales, las columnas con PIECA (1, 2, 3 y 4) lograron concentraciones de P-PO<sub>4</sub> en el efluente entre 2.68 y 4.98 mg/L, la columna 3 cuyo influente se estableció en pH de 10 unidades presentó la mejor remoción (Figura 4.8), alrededor de 5% más que la columna 1 que tuvo un pH variable en el influente (entre 7.3 y 7.8 unidades).

Por otra parte es de resaltar que en la columna 4 en la que se utilizó agua destilada presentó una remoción en el efluente muy parecida a la obtenida en las columnas 1 y 2 en las que se alimentó agua residual parcialmente tratada (Tabla 4.14), esto indica que si se realizan experimentos con agua simple en condiciones similares se pueden obtener resultados muy cercanos a los que se tendrían con agua residual parcialmente tratada.

Respecto al pH, en las columnas con valores de 9 y 10 en el influente disminuyó a valores cercanos a 8 y 9 respectivamente, mientras que en las demás el valor se mantuvo cercano a la neutralidad.

Tabla 4.13 Concentración de P-PO<sub>4</sub> en la muestra semanal del efluente de cada columna

Columna	Clave de la columna	Concentración de P-PO <sub>4</sub> (mg /L) del efluente de cada columna											
		Semana											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	P, agua tratada, pH sin modificar	3.15	3.10	4.98	4.86	4.58	4.79	4.54	4.49	4.77	4.77	4.77	4.84
2	P, agua tratada, pH=9	2.80	2.80	2.98	3.98	4.05	3.98	4.35	4.38	4.12	4.00	4.12	4.12
3	P, agua tratada, pH=10	2.68	2.77	2.89	3.15	4.00	4.39	3.86	4.21	4.00	3.96	4.05	4.03
4	P, agua destilada, pH sin modificar	3.54	3.56	3.45	3.75	4.19	4.56	4.31	4.38	4.35	4.44	4.38	4.42
5	G, agua tratada, pH sin modificar	8.85	8.97	8.83	8.90	8.88	9.39	9.27	9.34	9.04	9.50	9.48	9.46

Tabla 4.14 Porcentaje de remoción de P-PO<sub>4</sub> en la muestra semanal del efluente de cada columna

Columna	Clave de la columna	Porcentaje de remoción de P-PO <sub>4</sub> en la muestra semanal del efluente de cada columna											
		Semana											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	P, agua tratada, pH sin modificar	86.03	86.23	77.88	78.40	79.63	78.71	79.84	80.05	78.81	78.81	78.81	78.50
2	P, agua tratada, pH=9	87.42	87.42	86.59	82.10	81.79	82.10	80.43	80.33	81.47	82.00	81.47	81.47
3	P, agua tratada, pH=10	88.10	87.69	87.17	86.04	82.23	80.51	82.85	81.30	82.23	82.43	82.02	82.12
4	P, agua destilada, pH sin modificar	84.02	83.91	84.44	83.07	81.08	79.41	80.56	80.25	80.35	79.93	80.25	80.04
5	G, agua tratada, pH sin modificar	60.62	60.10	60.72	60.41	60.51	58.24	58.76	58.45	59.79	57.73	57.83	57.93

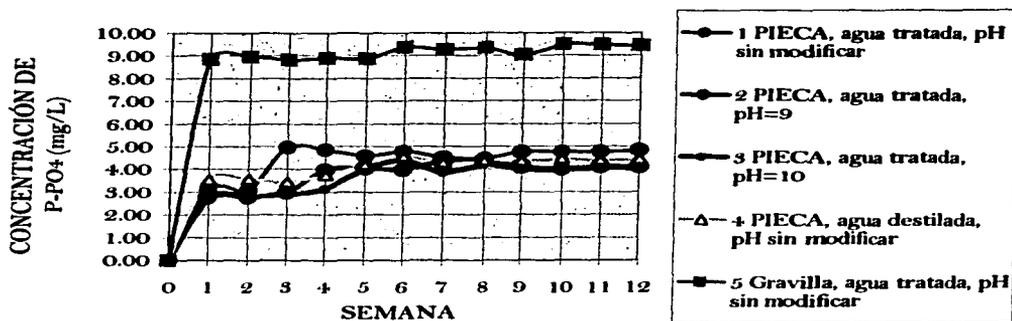


Figura 4.7 Concentración de P-PO<sub>4</sub> en la muestra semanal del efluente de cada columna

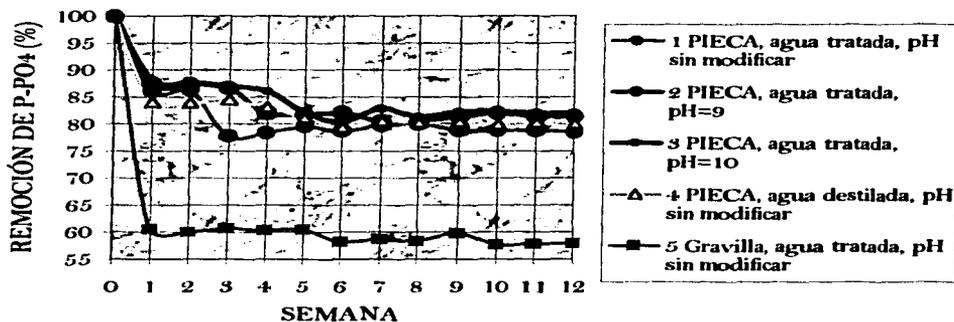


Figura 4.8 Porcentaje de remoción de P-PO<sub>4</sub> en el efluente de cada columna

TESIS CON  
 FALTA DE ORIGEN

Tabla 4.15 Valor de pH en la muestra semanal del efluente de cada columna

Columna	Influente promedio	Valor del pH del efluente de cada semana											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	7.45	7.70	7.08	7.11	7.40	6.92	7.12	7.08	7.14	6.95	7.06	7.33	7.12
2	9.00	8.01	7.88	7.97	8.09	7.99	8.09	8.18	8.85	8.11	7.85	7.94	7.96
3	10.00	9.23	9.55	9.44	9.48	9.36	9.35	9.41	9.05	9.10	9.09	8.96	8.99
4	6.78	7.81	7.18	6.90	6.97	6.74	6.85	6.98	6.69	6.89	7.03	6.88	6.92
5	7.45	7.56	7.39	7.04	7.46	7.25	7.12	7.45	7.33	7.22	7.14	7.35	7.19

PIECA SIN FALLA DE ORIGEN

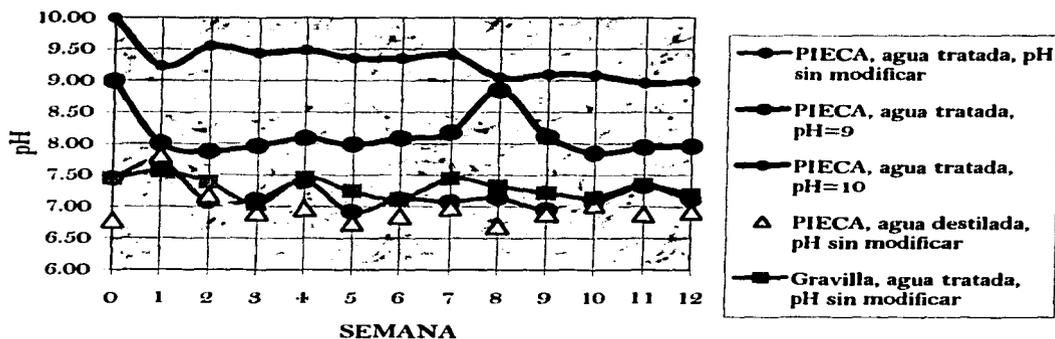


Figura 4.9 Valores de pH de la muestra semanal del efluente de cada columna

---

#### 4.3 CONCLUSIONES DE LA PRIMERA ETAPA EXPERIMENTAL

Se seleccionaron materiales para el empaque de las columnas que por su contenido de minerales (Ca, Fe, Al) fueran afines a los ortofosfatos, es decir, que fueran capaces de adsorberlos y/o precipitarlos logrando así la remoción de estos, y que además tuvieran ciertas características (porosidad, densidad y conductividad hidráulica) que los hagan recomendables para ser usados como medio de soporte en HA.

Se evaluó el porcentaje de remoción logrado bajo las siguientes condiciones experimentales: 22 mg/L de P-PO<sub>4</sub> en el influente, un gasto de 1000 mL/d equivalente a una RCHS de 127 mm, que es 10 veces mayor a la utilizada en HA. Con estas condiciones, los mejores resultados se obtuvieron con CAS (92.6 ± 1.0% de remoción) y el primer lote de PIECA (92.4 ± 2.2% de remoción), esto debido principalmente al contenido de calcio de estos dos materiales.

De esta etapa, se seleccionó PIECA como el material más adecuado debido que su composición es más uniforme que la de CAS y existe una mayor disponibilidad, además de que la remoción obtenida con este material es aceptable.

Las pruebas hechas en matraces con PIECA muestran que en las primeras 2 horas de estar en contacto con la solución de P-PO<sub>4</sub> con el material se alcanza alrededor del 85% de remoción. En los experimentos con columnas empacadas con PIECA y distintos valores de pH, se obtuvo 5% más de remoción modificando el pH en el influente de 8 a 10 unidades. Este resultado puede ser significativo, dependiendo de la concentración final deseada.

---

## **CAPÍTULO 5: SEGUNDA ETAPA EXPERIMENTAL**

### **5.1 EXPERIMENTACIÓN DE LA SEGUNDA ETAPA**

Considerando los resultados obtenidos en la primera etapa experimental, se definieron para esta segunda etapa las siguientes actividades:

- **Diseño, construcción y empacado de columnas a pequeña escala con PIECA y TEMIN**
- **Construcción y adaptación del sistema de almacenamiento y alimentación.**
- **Preparación de agua, enriquecida con sales de fosfato de potasio ( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ) a cuatro concentraciones diferentes.**
- **Evaluación experimental de las 16 columnas empacadas con los dos materiales pétreos, dos gastos diferentes y cuatro concentraciones diferentes en la alimentación.**
- **Obtención y procesamiento de resultados experimentales, comparación de la capacidad de remoción de los materiales.**

#### **5.1.1 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LAS COLUMNAS EXPERIMENTALES**

Las columnas experimentales fueron similares a las de la primera etapa experimental, con excepción de que en estas se redujo el diámetro de la columna por razones de espacio y sobre todo para disminuir la cantidad de material de empaque utilizado y el tiempo requerido para su preparación, se conservaron los

horizontes de empaque para mantener condiciones similares a las columnas anteriores.

Tabla 5.1 Características de materiales de empaque utilizados en la segunda etapa experimental

Tipo de material	Diámetro de partícula (mm)	Volumen total (L)	Peso aprox. (kg)
PIECA	2 - 3	4	10
TEMIN	2 - 3	4	10
Gravilla	4.0-8.0	1	2.5
Gravilla	8.0-12.0	1	2.5

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Tabla 5.2 Características del empackado de las columnas utilizadas en la segunda etapa experimental

Tipo de horizonte	Tipo de material	Diámetro de partícula (mm)	Longitud (mm)	Número de columnas
Soporte	PIECA	2 - 3	400	8
Soporte	TEMIN	2 - 3	400	8
Drenado 1	Gravilla	4.0-8.0	50	16
Drenado 2	Gravilla	8.0-12.0	100	16

### 5.1.2 PREPARACIÓN Y ALMACENAMIENTO DEL AGUA

- Para el desarrollo del experimento se utilizó un solo lote de agua cruda tomada del laboratorio de microbiología experimental.
- Para el almacenamiento del agua se utilizaron 4 recipientes.

- Se prepararon 50 L de agua en cada uno de los 4 recipientes, cada enriquecido con sales de fosfato hasta alcanzar una concentración en mg/L de 2.5, 5, 10 y 20 respectivamente.
- Para verificar que efectivamente se tenga dicha concentración se llevó a cabo la determinación de P-PO<sub>4</sub> conforme los métodos estándar (APHA, 1998).

Respecto a los recipientes de almacenamiento, fue necesario adecuar los tapones acondicionados con 4 microgoteros de venoclísis, para la dosificación del influente por gravedad y colocar una manguera de 4 mm de diámetro como respiradero al recipiente. La figura 5.1 muestra la forma de adaptación.



Figura 5.1 Recipientes de almacenamiento

### 5.1.3 OPERACIÓN DE LAS COLUMNAS EXPERIMENTALES

Las columnas experimentales se alimentaron con un flujo continuo, dosificado por un sistema de microgoteros, se utilizaron dos materiales de empaque (PIECA y TEMIN), dos gastos volumétricos y cuatro concentraciones diferentes de P-PO<sub>4</sub> en mg/L (2.5, 5, 10 y 20) como se muestra en la tabla 5.3. Cabe decir que los volúmenes de agua alimentados a las columnas (65 y 130 mL/d) equivalen a 10 y 20 veces la razón de carga hidráulica superficial (RCHS) propuesta para la operación de humedales de flujo vertical (HAFV). La colecta de las muestras se realizó semanalmente en frascos de 150 mL y se midieron la concentración de P-PO<sub>4</sub> y el pH (APHA, 1998).

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Tabla 5.3 Condiciones de operación de las columnas de la segunda etapa experimental

Clave de la columna	Material de empaque	Concentración en mg/L de P-PO <sub>4</sub>	Gasto en mL/día	RCHS en mm <sup>2</sup> /mm <sup>2</sup> d	RCHV en mm <sup>2</sup> /mm <sup>2</sup> d
P130_20	PIECA	20	130	256	0.641
P130_10	PIECA	10	130	256	0.641
P130_5	PIECA	5	130	256	0.641
P130_2.5	PIECA	2.5	130	256	0.641
P65_20	PIECA	20	65	128	0.321
P65_10	PIECA	10	65	128	0.321
P65_5	PIECA	5	65	128	0.321
P65_2.5	PIECA	2.5	65	128	0.321
T130_20	TEMIN	20	130	256	0.641
T130_10	TEMIN	10	130	256	0.641
T130_5	TEMIN	5	130	256	0.641
T130_2.5	TEMIN	2.5	130	256	0.641
T65_20	TEMIN	20	65	128	0.321
T65_10	TEMIN	10	65	128	0.321
T65_5	TEMIN	5	65	128	0.321
T65_2.5	TEMIN	2.5	65	128	0.321

## 5.2 RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE LA SEGUNDA ETAPA EXPERIMENTAL

En la tabla 5.4 se observan los valores de concentración de P-PO<sub>4</sub> en el efluente para cada una de las columnas experimentales. Al inicio, dicho efluente fue menor a 0.01 mg/L de P-PO<sub>4</sub> en todas las columnas, sin embargo, este parámetro aumentó a través del tiempo y conforme la concentración de P-PO<sub>4</sub> también se incremento. Este comportamiento se acentuó cuando el flujo suministrado fue de 130 mL/d.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Tabla 5.4 Concentración de P-PO<sub>4</sub> en la muestra semanal del efluente de cada columna

NO. COLUMNA	CLAVE	SEMANA									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	
1	P130_20	<0.01	7.16	7.57	6.86	7.91	8.00	8.21	8.33	8.82	
2	P65_20	<0.01	0.01	0.92	4.91	5.78	5.52	5.57	6.37	6.36	
3	T130_20	<0.01	4.04	4.81	5.03	6.18	6.73	7.07	7.61	7.73	
4	T65_20	<0.01	<0.01	0.69	2.74	2.80	3.23	4.03	4.63	5.29	
5	P130_10	<0.01	3.76	3.90	3.56	3.79	4.29	4.40	4.38	4.84	
6	P65_10	<0.01	<0.01	0.91	2.55	2.92	3.92	3.83	4.08	4.49	
7	T130_10	<0.01	2.79	3.07	3.37	3.57	3.85	4.06	4.31	4.46	
8	T65_10	<0.01	<0.01	<0.01	0.17	0.93	0.89	1.44	1.92	2.42	
9	P130_5	<0.01	1.68	1.77	1.78	1.98	2.01	2.00	1.88	2.06	
10	P65_5	<0.01	0.01	0.08	0.07	0.30	0.74	1.29	1.21	1.26	
11	T130_5	<0.01	1.10	1.38	1.47	1.45	1.60	1.66	1.77	1.91	
12	T65_5	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.01	0.75	0.92	0.96	
13	P130_2.5	<0.01	0.93	0.85	0.85	0.93	0.85	0.86	0.95	0.96	
14	P65_2.5	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.02	0.16	0.13	0.19	0.19	
15	T130_2.5	<0.01	0.08	0.09	0.09	0.10	0.12	0.12	0.13	0.13	
16	T65_2.5	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	

Nota: Tanto en las tablas como en las figuras, se utilizan claves para representar a cada columna, la letra de la clave corresponde al material de empaque (T=TEMIN, P=PIECA), la primera cifra al

influyente (mL/d) y la última cifra a la concentración inicial de P-PO<sub>4</sub> (mg/L). Cabe mencionar que las concentraciones reales de los influentes fueron: 2.52, 4.98, 10.12 y 20.36 mg/L, los cálculos y resultados están basados a dichas concentraciones, sin embargo para simplificar el manejo de información, se utilizaran números redondeados (2.5, 5, 10 y 20, respectivamente) al referirse a ellas.

Respecto a los resultados en porcentaje de remoción (Tabla 5.5), las columnas con la menor concentración en el influente (2.5 mg/L) lograron porcentajes superiores al 90%, con excepción de la columna número 13 (clave P130\_2.5) la cual evidenció remociones ligeramente mayores al 60%.

De las 16 columnas experimentales, la columna 16 (T165\_65), presentó el mejor porcentaje de remoción durante las 8 semanas de experimentación (>99.95%), lo cual permite inferir que bajo estas condiciones de operación, el agotamiento del TEMIN fue mínimo.

Tabla 5.5 Porcentaje de remoción de P-PO<sub>4</sub> en la muestra semanal del efluente de cada columna.

NO. COLUMNA	CLAVE	SEMANA									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	
1	P130_20	>99.95	64.82	62.82	66.31	61.16	60.70	59.67	59.10	56.69	
2	P65_20	>99.95	99.95	95.47	75.87	71.63	72.89	72.66	68.71	68.77	
3	T130_20	>99.95	80.17	76.39	75.30	69.63	66.94	65.28	62.65	62.02	
4	T65_20	>99.95	>99.95	96.59	86.52	86.23	84.12	80.22	77.25	74.04	
5	P130_10	>99.95	62.86	61.48	64.82	62.51	57.56	56.52	56.75	52.15	
6	P65_10	>99.95	99.95	90.97	74.84	71.15	61.25	62.17	59.63	55.60	
7	T130_10	>99.95	72.42	69.66	66.66	64.70	61.94	59.86	57.45	55.95	
8	T65_10	>99.95	>99.95	>99.95	98.37	90.76	91.20	85.78	81.06	76.11	
9	P130_5	>99.95	66.19	64.55	64.32	60.34	59.64	59.87	62.21	58.70	
10	P65_5	>99.95	99.80	98.36	98.52	93.88	85.15	74.15	75.79	74.62	
11	T130_5	>99.95	77.90	72.28	70.40	70.87	67.83	66.66	64.55	61.74	
12	T65_5	>99.95	>99.95	>99.95	>99.95	>99.95	99.95	84.92	81.48	80.77	
13	P130_2.5	>99.95	63.16	66.11	66.26	63.05	66.43	65.99	62.17	61.76	
14	P65_2.5	>99.95	>99.95	>99.95	>99.95	99.23	93.54	94.94	92.58	92.40	
15	T130_2.5	>99.95	97.01	96.60	96.46	95.84	95.44	95.23	94.91	94.71	
16	T65_2.5	>99.95	>99.95	>99.95	>99.95	>99.95	>99.95	>99.95	>99.95	>99.95	

TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN

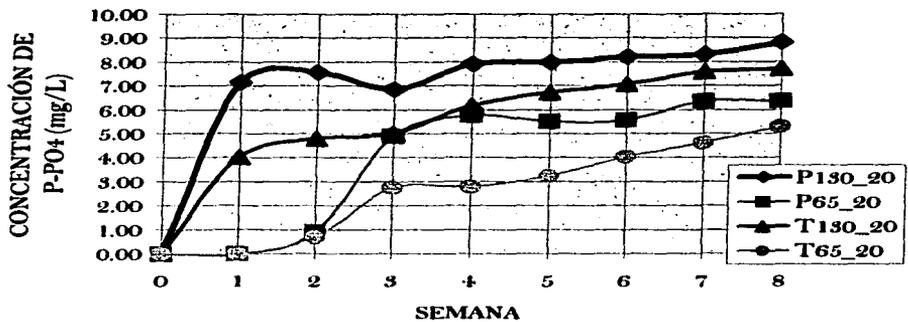
---

Por otra parte, en cuanto a los menores porcentajes de remoción (por debajo del 60% en algunos casos), estos se presentaron en las columnas con influente de 130 mL/d empacadas con PIECA. Cabe señalar que en este caso, la concentración inicial del influente no fue determinante.

De las columnas con la mayor la concentración en el influente (20 mg/L de P-PO<sub>4</sub>), las empacadas con TEMIN, presentaron menor concentración en el efluente, en comparación con sus equivalentes empacadas con PIECA, como se muestra en los perfiles de concentración de la figura 5.2.

Por otro lado, las columnas P130\_20 y T130\_20, es decir las de mayor flujo (130 mL/d) presentaron un incremento rápido en la concentración de P-PO<sub>4</sub> durante la primera semana (de 7 y 4 mg/L, respectivamente), mientras que las otras dos (P65\_20 y T65\_20), presentaron un incremento hasta la tercera semana. Es de resaltar que dichos incrementos, son de aproximadamente de 1.5 unidades menores en las columnas con TEMIN con respecto a las equivalentes empacadas con PIECA.

En cuanto a los perfiles de remoción de estas mismas columnas (Figura 5.3), el análisis estadístico de varianzas con un nivel de confianza del 99.5% (Anexo B.2.1), muestra que, a un gasto agua de 65 mL/d, las diferencias que se observan entre en los porcentajes de remoción de PIECA y TEMIN no son significativas, no obstante a un gasto de 130 mL/d, si lo son (Anexo B.2.2).



TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN

Figura 5.2 Concentración de P-PO<sub>4</sub> en el efluente de cada columna (influyente 20 mg/L)

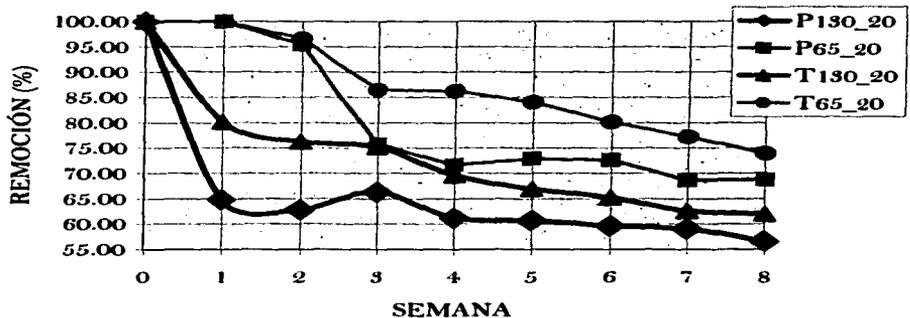
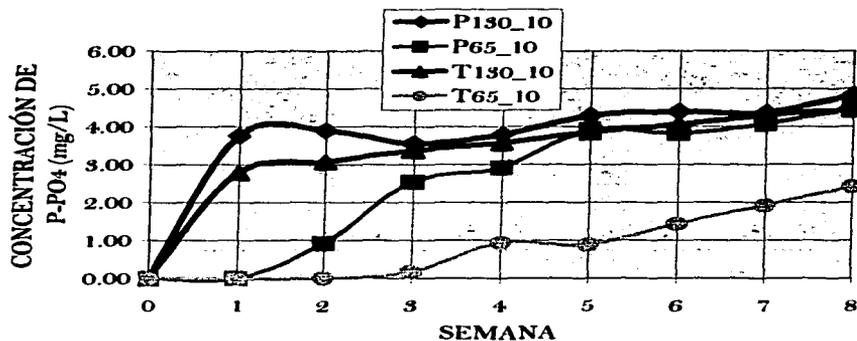


Figura 5.3 Remoción de P-PO<sub>4</sub> en el efluente de cada columna (influyente 20 mg/L)

---

En las columnas de 10 mg/L de P-PO<sub>4</sub> en el influente, los incrementos en los perfiles de concentración del efluente presentan la misma tendencia que los anteriores, sin embargo, en éstos el incremento es de menor magnitud (Figura 5.5). Cabe resaltar que, durante las últimas 4 semanas de experimentación, los efluentes de las columnas P130\_10, T103\_10 y P65\_10, tuvieron concentraciones muy cercanas entre ellos, llegando inclusive en la última semana a no variar entre sí en más de 0.4 mg/L (Figura 5.4).

Por otra parte, la columna T65\_10 a partir de la 3<sup>a</sup> semana, presentó un perfil de remoción mayor en más del 20% al de su equivalente (P65\_10) (Figura 5.5). El análisis estadístico de las varianzas confirma que a un gasto de 65 mL/d las diferencias en los porcentajes de remoción obtenidos con PIECA y TEMIN son significativas (Anexo B.2.3), mientras que las diferencias en los porcentajes de remoción obtenidos en las columnas con gasto de 130 mL/d no son significativas (Anexo B.2.4).



TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN

Figura 5.4 Concentración de P-PO<sub>4</sub> en el efluente de cada columna (influyente 10 mg/L)

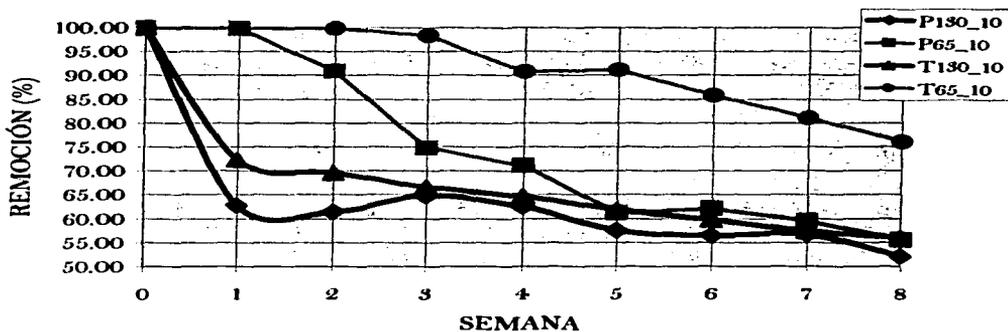


Figura 5.5 Remoción de P-PO<sub>4</sub> en el efluente de cada columna (influyente 10 mg/L)

En las columnas de 5 mg/L de P-PO<sub>4</sub> en el influente, y un flujo de agua de 130 mL/d, se observa un aumento rápido en la concentración del efluente durante la primera semana, mientras que en el efluente de la columna P65\_5 se presentó a partir de la 3<sup>a</sup> semana y el incremento en el de T65\_5 fue de menor magnitud y hasta la 5<sup>a</sup> semana (Figura 5.6).

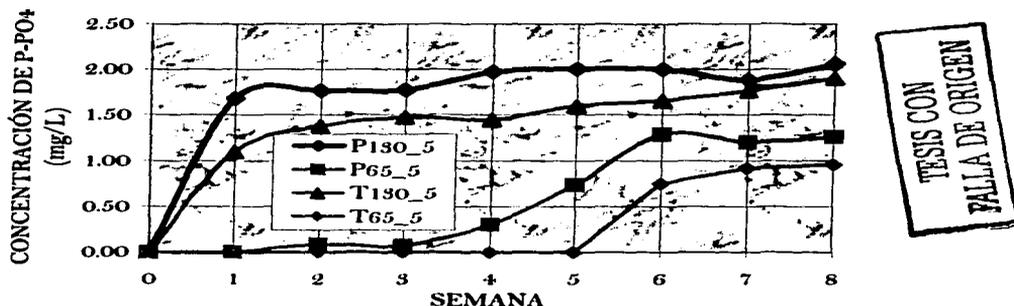
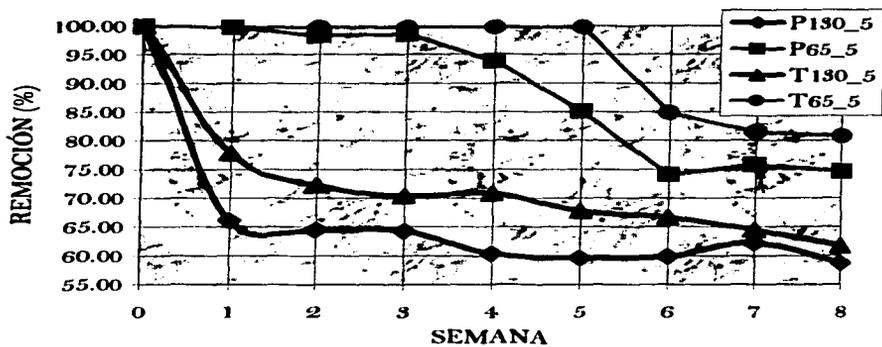


Figura 5.6 Concentración de P-PO<sub>4</sub> en el efluente de cada columna (influyente 5 mg/L)

Los porcentajes de remoción de las columnas P65\_5 y T65\_5 fueron superiores al 74% (Figura 5.7), y las diferencias no son significativas de acuerdo con el análisis estadístico de las varianzas (Anexo B.2.5), mientras que las columnas con flujo de 130 mL/d presentaron una remoción entre el 60 y 75% la mayor parte del tiempo, cuyas diferencias entre los dos perfiles remoción son significativas (Anexo B.2.6).



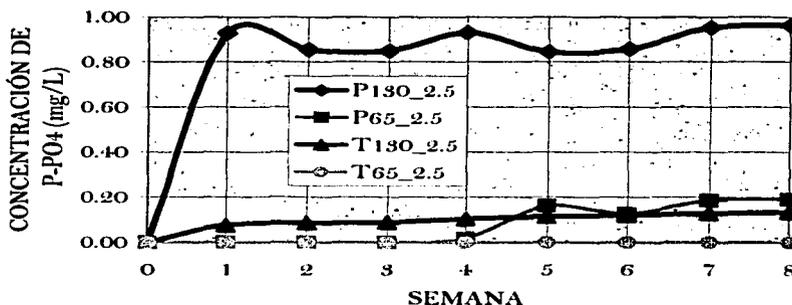
TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN

Figura 5.7 Remoción de P-PO<sub>4</sub> en el efluente de cada columna (influyente 5 mg/L)

Finalmente en los resultados de las columnas con 2.5 mg/L de P-PO<sub>4</sub> en el influente, la concentración disminuyó a valores menores a 1 mg/L. En los perfiles de las columnas empacadas con TEMIN se observó una tendencia lineal, la columna T65\_2.5 tuvo concentraciones menores a 0.01 mg/L en el efluente durante las 8 semanas de experimentación (Figura 5.8).

Este último resultado es muy importante, ya que para la prevención de la eutroficación de cuerpos acuáticos naturales y protección de la vida acuática, la EPA (Agencia de Protección Ambiental) de los EE.UU. recomienda concentraciones de fósforo total menores a 0.05 mg/L (Mueller y Helsel, 1999).

En términos generales, los resultados demuestran que se puede lograr reducir la concentración de  $P-PO_4$  hasta valores menores a 0.01 mg/L con TEMIN utilizado y 0.08 mg/L con PIECA empleando una RCHS alrededor de 10 veces mayor que la utilizada en los HA, por lo que solo el TEMIN estaría en condiciones de cumplir con ese requerimiento.



TESIS CON  
 PALLA DE COQUE

Figura 5.8 Concentración de  $P-PO_4$  en el efluente de cada columna (influyente 2.5 mg/L)

En cuanto a los perfiles de remoción, los porcentajes más bajos los presentó el efluente de la columna P130\_2.5 que osciló entre el 61 y 67%, en las otras tres columnas se tuvieron remociones mayores al 92%, cabe resaltar que con la columna T65\_2.5 se obtuvieron porcentajes mayores al 99.95% durante todas las semanas (Figura 5.9).

El análisis estadístico de la varianza con un nivel de significancia del 99.5% muestra que, las diferencias entre los porcentajes obtenidos con PIECA y TEMIN son significativas en ambos casos (Anexos B.2.7 y B.2.8).

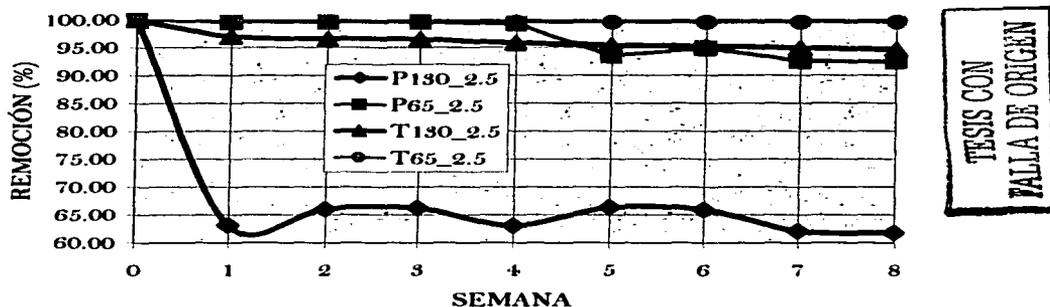


Figura 5.9 Remoción de P-PO<sub>4</sub> en el efluente de cada columna (influyente 2.5 mg/L)

En la tabla 5.6 se presenta el balance general de P-PO<sub>4</sub> por columna, de esta tabla se puede observar que, a mayor concentración de P-PO<sub>4</sub> en el influente se presenta menor porcentaje de remoción, pero los materiales de empaque acumulan una mayor cantidad de mg P-PO<sub>4</sub>/mg de material, y viceversa. Además, las columnas experimentales con G=65 mL/d presentaron los mejores porcentajes de remoción y fue mayor la retención de mg P-PO<sub>4</sub>/mg de material que en las de un flujo de agua de 130 mL/d.

Por otra parte, también se realizó una comparación entre los perfiles de remoción obtenidos con columnas empacadas con el mismo material y flujo de agua, pero distinta concentración de P-PO<sub>4</sub> en el influente, de acuerdo con el análisis estadístico de las varianzas las diferencias que presentaron son significativas (Anexos B.3.1 al B.3.4).

Tabla 5.6 Remoción total acumulada con TEMIN y PIECA

Clave de la columna	Duración de la prueba (Semanas)	Cantidad de P-PO <sub>4</sub> (mg)			% Total de remoción por columna
		Total alimentado (Entrada)	Total no retenido (Salida)	Total retenido (Acumulación)	
P130_20	8	1140.16	391.12	749.04	65.70
T130_20	8	1140.16	306.12	834.04	73.15
P65_20	8	1140.16	220.41	919.75	80.67
T65_20	8	1140.16	169.34	970.82	85.15
P130_10	8	566.72	204.87	361.85	63.85
T130_10	8	566.72	183.48	383.24	67.62
P65_10	8	566.72	141.28	425.44	75.07
T65_10	8	566.72	48.31	518.41	91.48
P130_5	8	278.88	104.75	174.13	62.44
T130_5	8	278.88	83.62	195.26	70.02
P65_5	8	278.88	28.51	250.37	89.78
T65_5	8	278.88	14.51	264.37	94.80
P130_2.5	8	141.12	44.69	96.43	68.33
T130_2.5	8	141.12	5.29	135.83	96.25
P65_2.5	8	141.12	4.28	136.84	96.96
T65_2.5	8	141.12	0.7	141.05	99.95

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

---

### 5.3 CONCLUSIONES DE LA SEGUNDA ETAPA EXPERIMENTAL

Se determinaron las condiciones de operación de las columnas experimentales referentes al tipo de alimentación, razón de carga hidráulica superficial (RCHS), volumen de agua a tratar, concentración de P-PO<sub>4</sub> y pH.

Los resultados demuestran que se puede lograr reducir la concentración de P-PO<sub>4</sub> hasta un valor menor a 0.01 mg/L con TEMIN utilizado y 0.08 mg/L con PIECA empleando una RCHS alrededor de 10 veces mayor que la utilizada en los HA. Estos resultados son muy importantes, ya que para la prevención de la eutroficación de cuerpos acuáticos naturales, es necesario reducir la concentración de P-PO<sub>4</sub> a valores menores a 0.05 mg/L, por lo que solo TEMIN cumpliría con esos requerimientos.

El TEMIN demostró mayor porcentaje de remoción de fosfatos que empleando PIECA. El análisis estadístico demuestra que, en algunos casos, las diferencias en la remoción sí son significativas, por lo que reafirma que, comparativamente el TEMIN es el material más adecuado para la remoción de P-PO<sub>4</sub>.

Cabe mencionar que en todas las columnas de esta etapa experimental, se observó que a mayor concentración de P-PO<sub>4</sub> en el influente, se presenta menor porcentaje de remoción, pero se acumula una mayor cantidad de mg P-PO<sub>4</sub>/mg de material y a la inversa.

Los resultados obtenidos permiten concluir que, mediante un arreglo en serie, y una RCHS 10 veces mayor a la utilizada en HA, se podría reducir la

---

concentración de P-PO<sub>4</sub> desde 20 mg/L hasta un valor menor a 0.01 mg/L con TEMIN y hasta 0.08 mg/L con PIECA.

#### 5.4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES GENERALES

Las columnas empacadas con CAS y PIECA presentaron valores de remoción de P-PO<sub>4</sub> superiores al 90%, cuando la concentración es de 22 mg/L de P-PO<sub>4</sub> en el influente, lo que permite obtener efluentes que cumplan con creces las normas nacionales, en lo que respecta a este parámetro (< 5 mg/L como P total, promedio mensual), mientras que las columnas empacadas con EVOL y gravilla los valores de remoción de P-PO<sub>4</sub> resultaron menores al 60% lo que impide lograr, bajo las condiciones experimentales establecidas, concentraciones en el efluente menores a las establecidas por las normas arriba citadas.

El tiempo de reacción entre la PIECA y el P-PO<sub>4</sub> ocurrió en dos etapas: en la primera, la remoción fue rápida, ya que durante los primeros 30 minutos se removió cerca del 70%, y la segunda fue lenta, alcanzando a los 1440 minutos el 94.6% de remoción.

De los experimentos realizados en las columnas operadas a distintos valores de pH, empacadas con PIECA proveniente del segundo lote de material, se observó que la columna alimentada con pH de 10 unidades, obtuvo la más alta remoción de P-PO<sub>4</sub> (cerca del 85%), mientras que la columna alimentada sin modificar pH (cercano a valores de 7 unidades) presentó la más baja remoción (cercana al 80%). Por lo tanto, en el caso de PIECA, valores de pH alcalinos le favorecen la remoción de ortofosfatos.

---

**Recomendaciones:**

**Realizar experimentos para modificar otras variables que pudieran afectar la remoción de P-PO<sub>4</sub>, por ejemplo, como sería el caso del tamaño de partícula de los materiales de empaque, el flujo de agua en las columnas, la longitud del horizonte de empaque, etc...**

**Asimismo, sería conveniente utilizar, evaluar y conocer el tiempo real de vida útil de estos materiales en sistemas a mayor escala.**

---

## **CAPÍTULO 6: BIBLIOGRAFÍA**

- **AIAD, 2003.** "2003 Año Internacional del Agua dulce ONU". [en línea, citado el 13 mayo-5:00 PM, 2003] <<http://www.wateryear2003.org>>
- **APHA, AWWA, WPFC. 1998.** Standard methods for the examination of water and wastewater analysis. American Public Health Association. 20th edition. Washington DC, EE.UU.
- **BCME, 2003.** Biblioteca de Consulta Microsoft® Encarta® 2003. © 1993-2002 Microsoft Corporation.
- **Boon A. 1985.** Report of a visit by members and staff of Wrc to Germany to investigate the root zone method for treatment of wastewaters. Wrc Report 376-S/1, Stevenage. Londres, Inglaterra.
- **Bosworth, A. 1996.** Transport properties. Wiley. Nueva York, EE.UU. Pp. 303-325.
- **Brett S., Guy, J., Morse, G. y Lester, J. 1997.** Phosphorus removal and recovery technologies. Selper Publications. Londres, Inglaterra. Pp. 1-17.
- **BSP, British Sulphur Publishing, 1998.** Phosphorus availability in the 21st century Management of a non-renewable resource, Phosphorus & Potassium Journal, Issue No: 217.
- **Brix, H., Arias, C. A., del Bubba, M. (2001).** How can Phosphorus Removal be sustained in Subsurface-flow Constructed Wetlands, 7<sup>th</sup> International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control, University of

---

Florida, Gainesville, Florida, EE.UU. Pp. 65-73.

➤ CEIT [en línea, citado el 22 Sep-2001 a las 11:00 AM] <[http://www1.ceit.es/asignaturas/ecologia/Hipertexto/11CAgu/150Eutro.htm#Nutrientes que eutrofizan las aguas](http://www1.ceit.es/asignaturas/ecologia/Hipertexto/11CAgu/150Eutro.htm#Nutrientes%20que%20eutrofizan%20las%20aguas)>.

➤ CNA, 2001. Situación del Subsector Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento 2001. Comisión Nacional del Agua. México D F, México, Pp. 51.

➤ CONABIO [en línea, citado el 22 Sep-2001 a las 1:00 PM] <<http://www.conabio.gob.mx/rhp/58.html>>.

➤ Cooper P., Job G., y Green F. 1996. Reed beds and constructed wetlands for wastewater treatment. Wrc. Severn Tren. Londres, Inglaterra. Pp. 123-138.

➤ Crites R. W. 1994. Design criteria and practice for constructed wetlands. Wat. Sci. Technol, Pp. 1-6.

➤ Drizo A. Frost C. A., Smith K. A. y Grace J. 1997. Phosphate and ammonium removal by constructed wetlands with horizontal subsurface flow, using shale as a substrate. Wat. Sci. Tech. **35**, 95-102.

➤ EPA, 1999. Rodzonealaeg op til 30 PE (in Danish). Enviromental Guidelines1, 1-46.

➤ Green M. y Upton J. 1995. Constructed reed beds. Appropriate technology for small communities. Wat. Environm. Res. **32** (3), 339-348.

➤ Jenkins, D. y S.W. Hermanowitz 1991. Principles of Chemical Phosphate Removal. In Sedlak, R. (Ed.). Phosphorus and Nitrogen Removal from Municipal

---

Wastewater: Principles and Practice. 2<sup>nd</sup> edition, Lewis Publishers, Chelsea, EE.UU.

➤ Johansson, L. 1997. The use of LECA (light expanded clay aggregates) for the removal of phosphorus from wastewater. *Wat. Sci. Tech.* 35(5): 87-93.

➤ Ksoll, W. 2002. Evaluation of the removal efficiency of a hybrid system with respect to phosphorus and *Escherichia coli*. Tesis profesional. Brandenburgische Technische Universität Cottbus. Brandenburgo, Alemania. Pp. 76-86.

➤ Kadlec R. H. 1996. Deterministic and stochastic aspects of constructed wetland performance and design. En: 5<sup>Th</sup> International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control. Viena, Austria. Pp. X/1-1 aX/1-8.

➤ Liu Ch., Huang Y., Shen y Cui J. 1999. Kinetics of hydroxyapatite precipitation at pH 10 to 11 Institute of Technical Chemistry and Physics, East China University of Science and Technology, 130, Meilong Road, P.O. Box 258, Shanghai 200237, República Popular de China.

➤ Luna-Pabello V. M., Durán C., Ramírez H., Fenoglio F. y Sánchez H. 1997. Los humedales artificiales. Una alternativa viable para el tratamiento de aguas residuales en zonas rurales. Anuario Latinoamericano de Educación Química, ALDEQ`97. San Luis, Argentina, 1, 51-56.

➤ Martín del Pozzo, A. 1990. Geoquímica y paleomagnetismo de la Sierra Chichinautzin. Tesis doctoral. Instituto de Geofísica, UNAM. México, D. F. Pp. 45-49

- 
- Maurer y M. Boller, 1999, **Modelling Of Phosphorus Precipitation In Wastewater Treatment Plants With Enhanced Biological Phosphorus Removal**, Swiss Federal Institute for Environmental Science and Technology (EAWAG), CH-8600 Dübendorf, Suiza, *Wat. Sci. Tech.* Vol. 39, No. 1, Pp. 147-163, 1999, Published By Elsevier Science Ltd.
  - Melack Mohn M., 2002. **Transport and Transformations of P, Fluvial and Lacustrine Ecosystems**. Department of Biological Sciences, University Of California, Santa Barbara, Ca, EE.UU. 93106.
  - Miranda Ríos Mónica y Luna-Pabello Víctor M. 2001. **Estado del Arte y Perspectivas de Aplicación de los Humedales Artificiales de Flujo Horizontal en México**. Serie: Tratamiento Biológico de Aguas Residuales, Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Química, UNAM.
  - Mueller, David K. y Helsel, Dennis R. 1999. "Nutrients in the Nation's Waters—Too Much of a Good Thing?" U.S. Geological Survey Circular 1136. National Water - Quality Assessment Program, [citado en línea Sep-2001] disponible en: <<http://water.usgs.gov/nawqa/circ-1136.html>>
  - NOM-001-ECOL-1996, 1997. **Norma Oficial Mexicana, Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales**. Diario Oficial de la Federación, Enero 6 de 1997.
  - ÖNORM 1995. ÖN B 2505: **Bepflanzte Bodenfilter (Pflanzenkläranlagen) - Anwendung, Bemessung, Bau und Betrieb**.

---

➤ **Ramírez-Carrillo H., Fenoglio F., Durán C. y Luna-Pabello V. M., 1997. Evaluation of hydraulic conductivity and efficiency of removal organic compounds in columns filled with gravel. Proceedings of the Third International Seminar of Experts on the Treatment of Industrial Effluents and Residues. México, D. F., Pp. 191-196.**

➤ **Recht, H. L. y Ghassemi, M. 1970, Kinetics and mechanism of precipitation and nature of the precipitate obtained in phosphate removal from wastewater using Aluminium (III) and Iron (III) salts, EE.UU. Federal Water Quality Administration, Wat. Plo. Con. Res. Series, 17010EKI.**

➤ **Sagan, Contaminación por detergentes [citado en línea Sep-2001] disponible en: <[http://sagan.uam.mx/hojared\\_AGUA/paginas/20agua.html](http://sagan.uam.mx/hojared_AGUA/paginas/20agua.html)>**

➤ **Song Y., Hahn H. H., y Hoffmann E. 2001. The Effects of pH And Ca/P Ratio on the precipitation of calcium phosphate, Institute For Aquatic Environmental Engineering, University Of Karlsruhe, Adenauerring 20, Karlsruhe, D-76128, Alemania Pp. 1-3.**

➤ **Suschka J., Machnicka A. y Poplawski S., 2001. Phosphates Recovery from Iron Phosphates Sludge, Technical University of Łódź, Bielsko-Biala Branch, ul. Willowa 2, 43-309 Bielsko-Biala, Polonia, (Environmental Technology, Vol. 22. Pp. 1295-1301 Received 12 March 2001; Accepted 30 May 2001).**

➤ **Suzuki, T., Nissanka, A. y Kurihara, Y. 1988. Amplification of total dry matter, nitrogen and phosphorus removal from stands of *Phragmites australis* by harvesting and reharvesting regenerated shoots. En Constructed wetlands for wastewater treatment. Editor Hammer, D. McGraw-Hill. Florida, EE.UU. Pp. 530-535.**

---

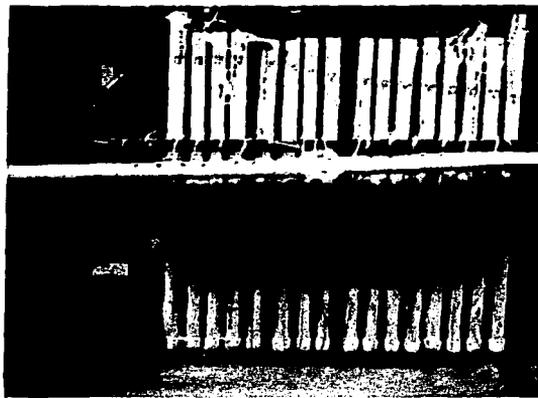
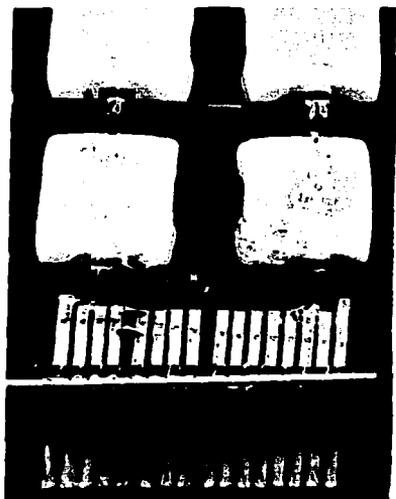
➤ Tanner, C., Sukias, J. y Upsdell, M. 1998. Substratum phosphorus accumulation during maturation of gravel-bed constructed wetlands. En **Memories of 6<sup>th</sup> International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control**. Sao Paulo, Brasil. Pp. 292-301.

➤ Walas, E. 1992. **Reaction kinetics for chemical engineers**. McGraw-Hill. Nueva York, EE.UU. Pp. 221-229.

➤ Welch, E. 1992. **Ecological effects of wastewater**. Chapman and Hall. Londres, Inglaterra. Pp. 158-187.

## CAPÍTULO 7: ANEXOS

### ANEXO A: COLUMNAS EXPERIMENTALES DE LA SEGUNDA ETAPA



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## ANEXO B: ANOVA

### B.1 SIMBOLOGÍA DE LOS CÁLCULOS EFECTUADOS

<b>J</b> = NÚMERO DE NIVELES O TRATAMIENTOS
<b>N<sub>j</sub></b> = TAMAÑO DE LA MUESTRA DEL NIVEL j
<b>N</b> = $\sum n_j$ = TAMAÑO DE LA MUESTRA
<b>T**</b> = $\sum \sum X_{ij}$ = SUMA DE TODOS LOS VALORES
<b>T*<sub>j</sub></b> = $\sum (i=1..i) X_{ij}$ = SUMA DE TODOS LOS VALORES DE LA COLUMNA j
<b>T**</b> = $\sum (i=1..j) X_{ij}$ = SUMA DE TODOS LOS VALORES DEL RENGLÓN i
<b>T*<sub>J</sub></b> = PROMEDIO DE TODAS LAS COLUMNAS
<b>T**</b> = PROMEDIO DE LOS RENGLONES
<b>CM</b> = $T^{**}/N$
<b>N-1</b> = $(J-1) + (N-J)$
SUMA DE CUADRADOS TOTAL = <b>SCTOTAL</b> = $(\sum \sum X_{ij})^2 - CM = S_{Ctr} - SCE$
SUMA DE CUADRADOS ENTRE TRATAMIENTOS = <b>S<sub>Ctr</sub></b> = $\sum (T^*_j)^2 / n_j - CM$
SUMA DE CUADRADOS DEL ERROR = <b>SCE</b> = <b>SCTOTAL</b> - <b>S<sub>Ctr</sub></b>

FUENTE DE VARIACIÓN (FV)	SUMA DE CUADRADOS (SC)	GRADOS DE LIBERTAD (GL)	CUADRADOS MEDIOS (MC)	FISHER CALCULADA (F <sub>c</sub> )	NIVEL DE SIGNIFICANCIA (α)	FISHER DE TABLAS (F <sub>t</sub> )
ENTRE TRATAMIENTOS	S <sub>Ctr</sub>	J-1	M <sub>Ctr</sub> = S <sub>Ctr</sub> / (J-1)	M <sub>Ctr</sub> / M <sub>CE</sub>	0.05	F <sub>γ1, γ2, α</sub>
DENTRO DE TRATAMIENTOS	SCE	N-J	M <sub>CE</sub> = SCE / (N-J)			
TOTAL	SCTOTAL	N-1				

CRITERIO (F <sub>c</sub> vs F <sub>t</sub> )	DECISIÓN
SI F <sub>c</sub> < F <sub>t</sub>	Ho SE ACEPTA
SI F <sub>c</sub> > F <sub>t</sub>	Ho SE RECHAZA

TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN

## B.2 COMPARACIÓN DE RESULTADOS ENTRE COLUMNAS CON DIFERENTE MATERIAL E IGUALES CONDICIONES DE OPERACIÓN

B.2.1-ANOVA: PIECA vs. TEMIN con  $G=65$  mL/d y  $C=20$  mg/L de P-PO<sub>4</sub> en el influente.

Ho: El % de remoción con PIECA es estadísticamente = al % de remoción con el TEMIN  
 H1: El % de remoción con PIECA es estadísticamente ≠ al % de remoción con el TEMIN

SEMANA	PIECA % REMOCIÓN	TEMIN % REMOCIÓN
1	99.95	99.95
2	95.47	96.59
3	75.87	86.52
4	71.63	86.23
5	72.89	84.12
6	72.66	80.22
7	68.71	77.25
8	68.77	74.04
MEDIA	78.24	85.62
DESVIACIÓN STD.	12.29	8.96
VARIANZA	151.11	80.35

<b>J=2</b>	
<b>T<sup>*</sup>j=625.95</b>	684.92
<b>n<sub>j</sub>=8</b>	8
<b>T<sup>*</sup>J=78.24</b>	85.62
<b>(T<sup>*</sup>)<sup>2</sup>=391813.40</b>	469115.41
<b>(T<sup>*</sup>J)<sup>2</sup>/n<sub>j</sub>=48976.68</b>	58639.43
<b>T<sup>**</sup>=1310.87</b>	
<b>N=16</b>	
<b>CM=107398.76</b>	
<b>ΣΣX<sub>ij</sub><sup>2</sup>=109236.30</b>	
<b>Σ(T<sup>*</sup>J)<sup>2</sup>/n<sub>j</sub>=107616.10</b>	
<b>SCTOTAL=1837.54</b>	
<b>S<sub>ctr</sub>=217.34</b>	
<b>SCE=1620.20</b>	

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

FV	SC	GL	MC	Fc	α	Ft
ENTRE TRATAMIENTOS	217.341	1	217.341	1.88	0.05	F <sub>1,14,0.05</sub> =4.60
DENTRO DE TRATAMIENTOS	1620.202	14	115.729			
TOTAL	1837.543	15				

CRITERIO	DECISIÓN	CONCLUSIONES
Fc < Ft	Ho SE ACEPTA	A una concentración 20 mg/L y un gasto de 65 mL/d, los porcentajes de remoción obtenidos con roca la PIECA y el TEMIN son iguales estadísticamente, aunque en el TEMIN tenga alrededor de un 7% más en el promedio de las remociones obtenidas.

**B.2.2-ANOVA: PIECA vs. TEMIN con G=130 mL/d y C=20 mg/L de P-PO<sub>4</sub> en el influente.**

**H<sub>0</sub>:** El % de remoción con PIECA es estadísticamente = al % de remoción con el TEMIN

**H<sub>1</sub>:** El % de remoción con PIECA es estadísticamente ≠ al % de remoción con el TEMIN

SEMANA	PIECA % REMOCIÓN	TEMIN % REMOCIÓN
1	64.82	80.17
2	62.82	76.39
3	66.31	75.3
4	61.16	69.63
5	60.7	66.94
6	59.67	65.28
7	59.1	62.65
8	56.69	62.02
MEDIA	61.41	69.80
DESVIACIÓN STD.	3.14	6.78
VARIANZA	9.83	45.93

J=2		
T <sup>*</sup> J=	491.27	558.38
n <sub>j</sub> =	8	8
T <sup>*</sup> J=	61.41	69.80
(T <sup>*</sup> ) <sup>2</sup> =	241346.21	311788.22
(T <sup>*</sup> J) <sup>2</sup> /n <sub>j</sub> =	30168.28	38973.53
T <sup>**</sup> =	1049.65	
N=	16	
CM=	68860.32	
ΣΣX <sub>ij</sub> <sup>2</sup> =	69532.14	
Σ(T <sup>*</sup> J) <sup>2</sup> /n <sub>j</sub> =	69141.80	
SCTOTAL=	671.82	
SCTr=	281.48	
SCE=	390.34	

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

FV	SC	GL	MC	Fc	α	Ft
ENTRE TRATAMIENTOS	281.48	1	281.48	10.10	0.05	F <sub>1,14,0.05</sub> = 4.60
DENTRO DE TRATAMIENTOS	390.34	14	27.88			
TOTAL	671.82	15				

CRITERIO	DECISIÓN	CONCLUSIONES
F <sub>c</sub> > F <sub>t</sub>	H <sub>0</sub> SE RECHAZA	A una concentración 20 mg/L y un gasto de 130 mL/d, los porcentajes de remoción obtenidos con la PIECA y el TEMIN son diferentes estadísticamente, siendo mayor en un 9% el promedio de la remoción obtenida con el TEMIN que el promedio obtenido con la PIECA.

**B.2.3-ANOVA: PIECA vs. TEMIN con G=65 mL/d y C=10 mg/L de P-PO<sub>4</sub> en el influente.**

**Ho:** El % de remoción con PIECA es estadísticamente = al % de remoción con el TEMIN

**H1:** El % de remoción con PIECA es estadísticamente ≠ al % de remoción con el TEMIN

SEMANA	PIECA % REMOCIÓN	TEMIN % REMOCIÓN
1	99.95	99.95
2	90.97	99.95
3	74.78	98.37
4	71.15	90.76
5	61.25	91.2
6	62.17	85.78
7	59.63	81.06
8	55.6	76.11
MEDIA	71.93	90.39
DESVIACIÓN STD.	15.95	8.92
VARIANZA	254.41	79.65

J=	2	
T <sub>j</sub> =	575.45	723.08
n <sub>j</sub> =	8	8
T <sub>·j</sub> =	71.93	90.39
(T <sub>j</sub> ) <sup>2</sup> =	331142.70	522844.69
(T <sub>·j</sub> ) <sup>2</sup> /n <sub>j</sub> =	41392.84	65355.59
T <sup>2</sup> ·=	1298.53	
N=	16	
CM=	105386.26	
ΣΣX <sub>ij</sub> <sup>2</sup> =	109086.85	
Σ(T <sub>·j</sub> ) <sup>2</sup> /n <sub>j</sub> )	106748.42	
SCTOTAL=	3700.59	
Sctr=	1362.16	
SCE=	2338.43	

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

FV	SC	GL	MC	Fc	α	Ft
ENTRE TRATAMIENTOS	1362.16	1	1362.16	8.16	0.05	F <sub>1,14,0.05</sub> = 4.60
DENTRO DE TRATAMIENTOS	2338.43	14	167.03			
TOTAL	3700.59	15				

CRITERIO	DECISIÓN	CONCLUSIONES
F <sub>c</sub> > F <sub>t</sub>	Ho SE RECHAZA	A una concentración 10 mg/L y un gasto de 65 mL/d, los porcentajes de remoción obtenidos con la PIECA y el TEMIN son diferentes estadísticamente, siendo mayor en un 20% el promedio de la remoción obtenida con el TEMIN que el promedio obtenido con la PIECA.

**B.2.4-ANOVA: PIECA vs. TEMIN con G=130 mL/d y C=10 mg/L de P-PO<sub>4</sub> en el influente.**

**Ho:** El % de remoción con PIECA es estadísticamente = al % de remoción con el TEMIN

**H1:** El % de remoción con PIECA es estadísticamente ≠ al % de remoción con el TEMIN

SEMANA	PIECA % REMOCIÓN	TEMIN % REMOCIÓN
1	62.86	72.42
2	61.48	69.66
3	64.82	66.66
4	62.51	64.70
5	57.56	61.94
6	56.52	59.86
7	56.75	57.45
8	52.15	55.95
MEDIA	59.33	63.58
DESVIACIÓN STD.	4.25	5.83
VARIANZA	18.08	34.02

<b>J</b> =	2	
<b>T<sup>*</sup>J</b>	174.65	508.64
<b>n<sub>j</sub></b>	8	8
<b>T<sup>*</sup>J</b>	59.33	63.58
<b>(T<sup>*</sup>J)<sup>2</sup></b>	225292.62	258714.65
<b>(T<sup>*</sup>J)<sup>2</sup>/n<sub>j</sub></b>	28161.58	32339.33
<b>T<sup>**</sup></b>	983.29	
<b>N</b>	16	
<b>CM</b>	60428.70	
<b>ΣΣX<sub>ij</sub><sup>2</sup></b>	60865.66	
<b>Σ(T<sup>*</sup>J<sup>2</sup>/n<sub>j</sub>)</b>	60500.91	
<b>SCTOTAL</b>	436.96	
<b>SCtr</b>	72.21	
<b>SCE</b>	364.75	

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

FV	SC	GL	MC	Fc	α	Ft
ENTRE TRATAMIENTOS	72.21	1.0	72.21	2.77	0.05	F 1,14,0.05= 4.60
DENTRO DE TRATAMIENTOS	364.75	14.0	26.05			
TOTAL	436.96	15				

CRITERIO	DECISIÓN	CONCLUSIONES
Fc < Ft	Ho SE ACEPTA	A una concentración 10 mg/L y un gasto de 130 mL/d, los porcentajes de remoción obtenidos con la PIECA y el TEMIN son iguales estadísticamente, aunque en el TEMIN tenga alrededor de un 4% más en el promedio de las remociones obtenidas.

**B.2.5-ANOVA: PIECA vs. TEMIN con G=65 mL/d y C=5 mg/L de P-PO<sub>4</sub> en el influente.**

**H<sub>0</sub>:** El % de remoción con PIECA es estadísticamente = al % de remoción con el TEMIN  
**H<sub>1</sub>:** El % de remoción con PIECA es estadísticamente ≠ al % de remoción con el TEMIN

SEMANA	PIECA % REMOCIÓN	TEMIN % REMOCIÓN
1	99.95	99.95
2	98.56	99.95
3	98.52	99.95
4	93.88	99.95
5	85.15	99.95
6	74.15	84.92
7	75.79	81.48
8	74.62	80.77
MEDIA	87.53	93.27
DESVIACIÓN STD.	11.45	9.09
VARIANZA	131.16	82.60

<b>J=</b>	2	
<b>T<sup>*</sup>J=</b>	700.27	746.17
<b>nj=</b>	8	8
<b>T<sup>*</sup>J=</b>	87.53	93.27
<b>(T<sup>*</sup>)<sup>2</sup>=</b>	490378.07	556769.67
<b>(T<sup>*</sup>J)<sup>2</sup>/nj=</b>	61297.26	69596.21
<b>T<sup>**</sup>=</b>	1446.44	
<b>N=</b>	16	
<b>CM=</b>	130761.79	
<b>ΣEXij<sup>2</sup>=</b>	132389.78	
<b>Σ(T<sup>*</sup>J<sup>2</sup>/nj)</b>	130893.47	
<b>SCTOTAL=</b>	1627.99	
<b>SCTr=</b>	131.68	
<b>SCE=</b>	1496.31	

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

FV	SC	GL	MC	Fc	α	Ft
ENTRE TRATAMIENTOS	131.68	1	131.68	1.23	0.05	F <sub>1,14,0.05</sub> = 4.60
DENTRO DE TRATAMIENTOS	1496.31	14	106.88			
TOTAL	1627.99	15				

CRITERIO	DECISIÓN	CONCLUSIONES
Fc < Ft	Ho SE ACEPTA	A una concentración 5 mg/L y un gasto de 65 mL/d, los porcentajes de remoción obtenidos con la PIECA y el TEMIN son iguales estadísticamente, aunque en el TEMIN tenga alrededor de un 5% más en el promedio de las remociones obtenidas.

**B.2.6-ANOVA: PIECA vs. TEMIN con G=130 mL/d y C=5 mg/L de P-PO<sub>4</sub> en el influente.**

**H<sub>0</sub>:** El % de remoción con PIECA es estadísticamente = al % de remoción con el TEMIN  
**H<sub>1</sub>:** El % de remoción con PIECA es estadísticamente ≠ al % de remoción con el TEMIN

SEMANA	PIECA % REMOCIÓN	TEMIN % REMOCIÓN
1	66.19	77.9
2	64.55	72.28
3	64.32	70.4
4	60.34	70.87
5	59.64	67.83
6	59.87	66.66
7	62.21	64.55
8	58.70	61.47
MEDIA	61.98	69.00
DESVIACIÓN STD.	2.76	5.05
VARIANZA	7.60	25.54

<b>J=2</b>		
<b>T<sup>2</sup><sub>J</sub>=</b>	<b>495.82</b>	<b>551.96</b>
<b>n<sub>J</sub>=</b>	<b>8</b>	<b>8</b>
<b>T<sup>2</sup><sub>J</sub>=</b>	<b>61.98</b>	<b>69.00</b>
<b>(T<sup>2</sup><sub>J</sub>)<sup>2</sup>=</b>	<b>245837.47</b>	<b>304659.84</b>
<b>(T<sup>2</sup><sub>J</sub>)<sup>2</sup>/n<sub>J</sub>=</b>	<b>30729.68</b>	<b>38082.48</b>
<b>T<sup>2</sup><sub>**</sub>=</b>	<b>1047.78</b>	
<b>N=</b>	<b>16</b>	
<b>CM=</b>	<b>68615.18</b>	
<b>Σ(X<sub>i</sub>-<math>\bar{X}</math>)<sup>2</sup>=</b>	<b>69044.17</b>	
<b>Σ(T<sup>2</sup><sub>J</sub><sup>2</sup>/n<sub>J</sub>)=</b>	<b>68812.16</b>	
<b>SCTOTAL=</b>	<b>428.99</b>	
<b>SCTr=</b>	<b>196.98</b>	
<b>SCE=</b>	<b>232.01</b>	

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

FV	SC	GL	MC	F <sub>c</sub>	$\alpha$	F <sub>t</sub>
ENTRE TRATAMIENTOS	196.98	1	196.98	11.89	0.05	F <sub>1,14,0.05</sub> =4.60
DENTRO DE TRATAMIENTOS	232.01	14	16.57			
TOTAL	428.99	15				

CRITERIO	DECISIÓN	CONCLUSIONES
F <sub>c</sub> >F <sub>t</sub>	H <sub>0</sub> SE RECHAZA	A una concentración 5 mg/L y un gasto de 130 mL/d, los porcentajes de remoción obtenidos con la PIECA y el TEMIN son diferentes estadísticamente, siendo mayor en un 7% el promedio de la remoción obtenida con el TEMIN que el promedio obtenido con la PIECA.

**B.2.7-ANOVA: PIECA vs. TEMIN con G=65 mL/d y C=2.5 mg/L de P-PO<sub>4</sub> en el influente.**

Ho: El % de remoción con PIECA es estadísticamente = al % de remoción con el TEMIN

H1: El % de remoción con PIECA es estadísticamente ≠ al % de remoción con el TEMIN

SEMANA	PIECA % REMOCIÓN	TEMIN % REMOCIÓN
1	99.95	99.95
2	99.95	99.95
3	99.46	99.95
4	95.84	99.95
5	95.84	99.95
6	95.23	99.95
7	94.91	99.95
8	94.71	99.95
MEDIA	96.99	99.95
DESVIACIÓN STD.	2.36	0.00
VARIANZA	5.56	0.00

J=	2	
T'j=	775.89	779.6
nj=	8	8
T'j=	96.99	99.95
(T'j) <sup>2</sup> =	602005.29	639360.16
(T'j) <sup>2</sup> /nj=	75250.66	79920.02
T**=	1575.49	
N=	16	
CM=	155135.55	
ΣΣXij <sup>2</sup> =	155209.57	
Σ(T'j) <sup>2</sup> /nj=	155170.68	
SCTOTAL=	74.03	
Sctr=	35.14	
SCE=	38.89	

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

FV	SC	GL	MC	Fc	α	Ft
ENTRE TRATAMIENTOS	35.14	1	35.14	12.65	0.05	F <sub>1,14,0.05</sub> = 4.60
DENTRO DE TRATAMIENTOS	38.89	14	2.78			
TOTAL	74.03	15				

CRITERIO	DECISIÓN	CONCLUSIONES
Fc > Ft	Ho SE RECHAZA	A una concentración 2.5 mg/L y un gasto de 65 mL/d, los porcentajes de remoción obtenidos con la PIECA y el TEMIN son diferentes estadísticamente, siendo mayor en promedio un 5% el porcentaje de remoción obtenido con el TEMIN.

**B.2.8-ANOVA: PIECA vs. TEMIN con G= 130 mL/d y C=2.5 mg/L de P-PO<sub>4</sub> en el influente.**

**Ho:** El % de remoción con PIECA es estadísticamente = al % de remoción con el TEMIN

**H1:** El % de remoción con PIECA es estadísticamente ≠ al % de remoción con el TEMIN

SEMANA	PIECA % REMOCIÓN	TEMIN % REMOCIÓN
1	63.16	97.01
2	66.11	96.6
3	66.26	96.46
4	63.05	95.84
5	66.43	95.44
6	65.99	95.25
7	62.17	94.91
8	61.76	94.71
MEDIA	64.37	95.78
DESVIACIÓN STD:	2.01	0.84
VARIANZA	4.05	0.71

<b>J=2</b>	
<b>T<sup>*</sup>J</b>	514.93 766.22
<b>n<sub>j</sub></b>	8 8
<b>T<sup>*</sup>J</b>	64.37 95.78
<b>(T<sup>*</sup>J)<sup>2</sup></b>	265152.90 587093.09
<b>(T<sup>*</sup>J)<sup>2</sup>/n<sub>j</sub></b>	33144.11 73386.64
<b>T<sup>**</sup></b>	1281.15
<b>N=16</b>	
<b>CM=</b>	102584.08
<b>ΣΣX<sub>ij</sub><sup>2</sup></b>	106564.02
<b>Σ(T<sup>*</sup>J<sup>2</sup>/n<sub>j</sub>)</b>	106530.75
<b>SCTOTAL</b>	3979.94
<b>SCTr</b>	3946.67
<b>SCE</b>	33.28

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

FV	SC	GL	MC	Fc	α	Ft
ENTRE TRATAMIENTOS	3946.67	1	3946.67	1660.47	0.05	F 1,140.05 = 4.60
DENTRO DE TRATAMIENTOS	33.28	14	2.38			
TOTAL	3979.94	15				

CRITERIO	DECISIÓN	CONCLUSIONES
Fc > Ft	Ho SE RECHAZA	A una concentración 5 mg/L y un gasto de 130 mL/d, los porcentajes de remoción obtenidos con la PIECA y el TEMIN son diferentes estadísticamente, siendo mayor en un 30% el promedio de la remoción obtenida con el TEMIN que el promedio obtenido con la PIECA.

**B.3 COMPARACIÓN DE RESULTADOS ENTRE COLUMNAS CON EL MISMO MATERIAL,  
MISMO GASTO VOLUMÉTRICO Y DIFERENTE CONCENTRACIÓN EN EL INFLUENTE**

B.3.1-ANOVA: PIECA con G=130 mL/d y diferentes concentraciones de P-PO<sub>4</sub> en el influente.

SEMANA	TRATAMIENTOS: CONCENTRACIÓN mg/L DE P-PO <sub>4</sub> EN EL INFLUENTE			
	C1=20	C2=10	C3=5	C4=2.5
% DE REMOCIÓN OBTENIDOS				
1	64.82	80.17	66.19	63.16
2	62.82	76.39	64.55	66.11
3	66.31	75.3	64.32	66.26
4	61.16	69.63	60.34	63.05
5	60.7	66.94	59.64	66.43
6	59.67	65.28	59.87	65.99
7	59.1	62.65	62.21	62.17
8	56.69	62.02	58.70	61.76
MEDIA	61.41	69.80	61.98	64.37
DESVIACIÓN STD.	3.14	6.78	2.76	2.01
VARIANZA	9.83	45.93	7.60	4.05

$J'=4$			
$T_j'=491.27$	558.38	495.82	514.93
$n_j=8$	8	8	8
$T_j=61.41$	69.80	61.98	64.37
$(T_j')^2=241346.21$	311788.22	245837.47	265152.90
$(T_j')^2/n_j=30168.28$	38973.53	30729.68	33144.11
$T''=2060.40$	<p align="center"><b>CONCLUSIÓN</b> Con un gasto volumétrico de 130 mL/d y 4 diferentes concentraciones de P-PO<sub>4</sub> en el influente, los porcentajes de remoción obtenidos con la PIECA son diferentes estadísticamente.</p>		
$N=32$			
$CM=132664.01$			
$\Sigma\Sigma X_j^2=133487.50$			
$\Sigma(T_j^2/n_j)=133015.60$			
$SCTOTAL=823.50$			
$SCTr=351.60$			
$SCE=471.90$			

FV	SC	GL	MC	Fc	$\alpha$	Ft	CRITERIO	DECISIÓN
ENTRE TRATAMIENTOS	351.60	3	117.20	6.95	0.05	$F_{3,28,0.05}=2.95$	Fc>Ft	Ho SE RECHAZA
DENTRO DE TRATAMIENTOS	471.90	28	16.85					
TOTAL	823.50	31						

B.3.2-ANOVA: PIECA con G=65 mL/d y diferentes concentraciones de P-PO<sub>4</sub> en el influente.

SEMANA	TRATAMIENTOS: CONCENTRACIÓN mg/L DE P-PO <sub>4</sub> EN EL INFLUENTE			
	C1=20	C2=10	C3=5	C4=2.5
% DE REMOCIÓN OBTENIDOS				
1	99.95	72.42	99.95	97.01
2	95.47	69.66	98.36	96.6
3	75.87	66.66	98.52	96.46
4	71.63	64.70	93.88	95.84
5	72.89	61.94	85.15	95.44
6	72.66	59.86	74.15	95.25
7	78.61	57.45	75.79	94.91
8	68.77	55.95	74.62	94.71
MEDIA	79.48	63.58	87.53	95.78
DESVIACIÓN STD.	11.68	5.83	11.45	0.84
VARIANZA	136.39	34.02	131.16	0.71

$J^2 = 4$			
$T^2 = 635.85$	508.64	700.27	766.22
$n_j = 8$	8	8	8
$T^2 J = 79.48$	63.58	87.53	95.78
$(T^2)^2 = 404305.22$	258714.65	490378.07	587093.09
$(T^2 J)^2/n_j = 50538.15$	32339.33	61297.26	73386.64
$T^{**} = 2610.98$			
$N = 32$			
$CM = 219098.02$			
$\sum \sum X_j^2 = 219677.39$			
$\sum (T^2 J)^2/n_j = 217561.38$			
$SCTOTAL = 6639.37$			
$SCTr = 4523.36$			
$SCE = 2116.01$			

**CONCLUSIÓN**  
Con un gasto volumétrico de 65 mL/d y 4 diferentes concentraciones de P-PO<sub>4</sub> en el influente, los porcentajes de remoción obtenidos con la PIECA son diferentes estadísticamente.

FV	SC	GL	MC	Fc	$\alpha$	Ft	CRITERIO	DECISIÓN
ENTRE TRATAMIENTOS	4523.36	3	1507.79	19.95	0.05	$F_{3,28,0.05} = 2.95$	Fc > Ft	Ho SE RECHAZA
DENTRO DE TRATAMIENTOS	2116.01	28	75.57					
TOTAL	6639.37	31						

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

B.3.3-ANOVA: TEMIN con G=130 mL/d y diferentes concentraciones de P-PO<sub>4</sub> en el influente.

SEMANA	TRATAMIENTOS: CONCENTRACIÓN mg/L DE P-PO <sub>4</sub> EN EL INFLUENTE			
	C1=20	C2=10	C3=5	C4=2.5
% DE REMOCIÓN OBTENIDOS				
1	80.17	72.42	77.9	97.01
2	76.39	69.66	72.28	96.6
3	75.3	66.66	70.4	96.46
4	69.63	64.70	70.87	95.84
5	66.94	61.94	67.83	95.44
6	65.28	59.86	66.66	95.23
7	62.65	57.45	64.65	94.91
8	62.02	55.95	61.74	94.71
MEDIA	69.80	63.58	69.04	95.78
DESVIACIÓN STD.	6.78	5.83	4.98	0.84
VARIANZA	45.93	34.02	24.84	0.71

$J^2 = 4$				
$T^2 = 558.38$	508.64	552.33	766.20	
$n_j = 8$	8	8	8	
$T \cdot J = 69.80$	63.58	69.04	95.78	
$(T^2) = 311788.22$	258714.65	305068.43	587062.44	
$(T \cdot J)^2/n_j = 98973.53$	32339.33	38133.55	73382.81	
$T^2 = 2385.55$				<b>CONCLUSIÓN</b> Con un gasto volumétrico de 130 mL/d y 4 diferentes concentraciones de P-PO <sub>4</sub> en el influente, los porcentajes de remoción obtenidos con el TEMIN son diferentes estadísticamente.
$N = 32$				
$CM = 177839.03$				
$\sum X^2 = 183567.75$				
$\sum (T^2/n_j) = 182829.22$				
$SCTOTAL = 5728.73$				
$SCTr = 4990.19$				
$SCE = 738.54$				

FV	SC	GL	MC	Fc	$\alpha$	Ft	CRITERIO	DECISIÓN
ENTRE TRATAMIENTOS	4990.19	3	1663.40	63.06	0.05	$F_{3,28,0.05} = 2.95$	Fc > Ft	Ho SE RECHAZA
DENTRO DE TRATAMIENTOS	738.54	28	26.38					
TOTAL	5728.73	31						

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

B.3.-ANOVA: TEMIN con  $G=65$  mL/d y diferentes concentraciones de  $P-PO_4$  en el influente.

SEMANA	TRATAMIENTOS: CONCENTRACIÓN mg/L DE P-PO <sub>4</sub> EN EL INFLUENTE			
	C <sub>1</sub> =20	C <sub>2</sub> =10	C <sub>3</sub> =5	C <sub>4</sub> =2.5
% DE REMOCIÓN OBTENIDOS				
1	99.95	99.95	99.95	99.95
2	96.59	99.95	99.95	99.95
3	86.52	98.37	99.95	99.95
4	86.23	90.76	99.95	99.95
5	84.12	91.20	99.95	99.95
6	80.22	85.78	84.92	99.95
7	77.25	81.06	81.48	99.95
8	74.04	76.11	80.77	99.95
MEDIA	85.62	90.39	93.27	99.95
DESVIACIÓN STD.	8.96	8.92	9.09	0.00
VARIANZA	80.35	79.65	82.60	0.00

$J^*=+$				
$T^j=$	684.92	723.08	746.17	796.80
$n_j=$	8	8	8	8
$T^*J=$	85.62	90.39	93.27	99.60
$(T^j)^2=$	469115.41	522844.69	556769.67	634890.24
$(T^*J^2)/n_j=$	58639.43	65355.59	69596.21	79361.28
$T^{**}=$	2950.97	<b>CONCLUSIÓN</b> Con un gasto volumétrico de 65 mL/d y + diferentes concentraciones de $P-PO_4$ en el influente, los porcentajes de remoción obtenidos con el TEMIN son diferentes estadísticamente.		
$N=$	32			
$CM=$	272132.00			
$\sum X^2=$	274650.69			
$\sum (T^*J^2)/n_j=$	272952.50			
$SCTOTAL=$	2518.69			
$SCT=$	820.50			
$SCE=$	1698.19			

FV	SC	GL	MC	Fc	$\alpha$	Ft	CRITERIO	DECISIÓN
ENTRE TRATAMIENTOS	820.50	1	820.50	6.76	0.05	$F_{3,28,0.05}=2.95$	F<Ft	Ho SE RECHAZA
DENTRO DE TRATAMIENTOS	1698.19	14	121.30					
TOTAL	2518.69	15						

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN