



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Sanitaria y
Recursos Hidráulicos (ERIS)

**MODELO MATEMÁTICO PARA DETERMINAR EL NIVEL DE EFICIENCIA DE REMOCIÓN
DE NUTRIENTES A TRAVÉS DEL USO DE ALGAS CLOROFITAS DESPUÉS DE LOS
FILTROS PERCOLADORES EN TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES**

Ing. Jeffrey Estuardo Argueta Gálvez

Ing. Rafael Arturo Blandón Blandón

Asesorado por el MSc. Ing. Félix Alan Douglas Aguilar Carrera

Guatemala, agosto de 2016

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**MODELO MATEMÁTICO PARA DETERMINAR EL NIVEL DE EFICIENCIA DE REMOCIÓN
DE NUTRIENTES A TRAVÉS DEL USO DE ALGAS CLOROFITAS DESPUÉS DE LOS
FILTROS PERCOLADORES EN TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES**

ESTUDIO ESPECIAL

PRESENTADO A LA ESCUELA REGIONAL DE INGENIERÍA SANITARIA Y
RECURSOS HIDRÁULICOS (ERIS)

POR

ING. JEFFREY ESTUARDO ARGUETA GÁLVEZ

ING. RAFAEL ARTURO BLANDÓN BLANDÓN

ASESORADO POR EL MSC. ING. FÉLIX ALAN DOUGLAS AGUILAR CARRERA

COMO REQUISITO PREVIO PARA OPTAR AL GRADO ACADÉMICO DE

**MAESTROS (*MAGISTER SCIENTIFICAE*) EN CIENCIAS
DE INGENIERÍA SANITARIA**

GUATEMALA, AGOSTO DE 2016

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Raúl Eduardo Ticún Córdoba
VOCAL V	Br. Henry Fernando Duarte García
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

**DIRECTOR DE LA ESCUELA REGIONAL DE INGENIERÍA SANITARIA Y
RECURSOS HIDRÁULICOS**

MSc. Ing. Pedro Cipriano Saravia Celis

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN DE ESTUDIO ESPECIAL

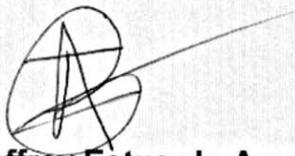
EXAMINADOR	MSc. Ing. Adán Ernesto Artemio Pocasangre Collazos
EXAMINADOR	MSc. Ing. Zenón Much Santos
EXAMINADOR	MSc. Ing. Félix Alan Douglas Aguilar Carrera

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento de los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presentamos a su consideración nuestro trabajo de graduación titulado:

**MODELO MATEMÁTICO PARA DETERMINAR EL NIVEL DE EFICIENCIA DE REMOCIÓN
DE NUTRIENTES A TRAVÉS DEL USO DE ALGAS CLOROFITAS DESPUÉS DE LOS
FILTROS PERCOLADRES EN TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES**

Tema que me fuera asignado por la Comisión de Admisión y Otorgamiento de Grado de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos (ERIS), con fecha 23 de julio de 2015.



Ing. Jeffrey Estuardo Argueta G.
Carné No. 201114192



Ing. Rafael Arturo Blandón B.
Carné No. 201590005



Guatemala 04 de julio de 2016

M.Sc. Ing Adán Pocasangre
Coordinador de la Maestría en Ingeniería Sanitaria
Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos (ERIS)
Facultad de ingeniería, USAC

Habiendo revisado el documento titulado:

"MODELO MATEMÁTICO PARA DETERMINAR EL NIVEL DE EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE NUTRIENTES A TRAVÉS DEL USO DE ALGAS CLOROFITAS DESPUÉS DE LOS FILTROS PERCOLADORES EN TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES",

Elaborado por los ingenieros Rafael Arturo Blandón Blandón y Jeffrey Estuardo Argueta Galvez, como parte de su Estudio Especial, y como requisito para optar al grado académico de Maestro en ciencias en Ingeniería Sanitaria, mediante la presente me permito informarle mi satisfacción con su contenido y por lo tanto, le comunico que dicho documento cuenta con mi aprobación.

Agradeciendo la atención prestada a la presente me suscribo de usted.

Atentamente.

MSc. Ing. Félix Alan Douglas Aguilar Carrera
Asesor del estudio

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

Ciudad de Guatemala, 08 de Agosto de 2016

Señores
Comisión de Administración y Otorgamiento de Grado
Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos

Respetuosamente les comunico que he revisado y aprobado, en mi calidad de Coordinador de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Sanitaria, el documento de Estudio Especial titulado:

MODELO MATEMÁTICO PARA DETERMINAR EL NIVEL DE EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE NUTRIENTES A TRAVÉS DEL USO DE ALGAS CLOROFITAS DESPUÉS DE LOS FILTROS PERCOLADORES EN TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Presentado por los estudiantes:

Ing. Jeffrey Estuardo Argueta Galvez
Ing. Rafael Arturo Blandón Blandón

Les manifiesto que los estudiantes han cumplido en forma satisfactoria con todos los requisitos establecidos por la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos (ERIS) y por la Universidad de San Carlos de Guatemala en la realización de su estudio.

Agradeciéndoles de antemano la atención a la presente, se suscribe de ustedes,

Atentamente,

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"

MSc. Ing. Adán Ernesto A. Pocasangre Collazos
Coordinador Maestría en Ciencias en Ingeniería Sanitaria

Msc. Ing. Adán Ernesto Pocasangre Collazos
Coordinador Maestría Ingeniería Sanitaria
ERIS / USAC

USAC
Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y
Recursos Hidráulicos
ERIS

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

Ciudad de Guatemala, 10 de Agosto de 2016

El director de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos (ERIS) después de conocer el dictamen del tribunal examinador integrado por los profesores siguientes: MSc. Ing. Zenón Much Santos, MSc. Ing. Félix Alan Douglas Aguilar Carrera, MSc. Ing. Adán Ernesto Pocasangre Collazos, así como el visto bueno del coordinador de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Sanitaria: Msc. Ing. Adán Ernesto Pocasangre Collazos y la revisión de lingüística realizada por el Licenciado Juan Pablo González de León, Colegiado No. 22930, del trabajo de los estudiantes: Ing. Jeffrey Estuardo Argueta Galvez, Ing. Rafael Arturo Blandón Blandón, titulado :

MODELO MATEMÁTICO PARA DETERMINAR EL NIVEL DE EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE NUTRIENTES A TRAVÉS DEL USO DE ALGAS CLOROFITAS DESPUES DE LOS FILTROS PERCOLADORES EN TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES.

En la representación de la Comisión de Admisión y Otorgamiento de Grado, procede a la autorización del mismo, en Guatemala a los 10 días del mes de Agosto de 2016.

IMPRÍMASE



MSc. Ing. Pedro Cipriano Saravia Celis
DIRECTOR

Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por ser mi guía y por darme la oportunidad de estudiar esta maestría y alcanzar este logro profesional.
- Mi madre** Luz Marina Blandón, por su dedicación, comprensión y paciencia.
- Mis hermanas** Maura Rosa y Flor de María Blandón Blandón, por su cariño, apoyo y amor hacia mí.
- Mi abuela** Maura Blandón por su cariño, buenos deseos y oraciones.

Rafael Arturo Blandón Blandón

ACTO QUE DEDICO A:

Dios

Quien me guía e ilumina en cada uno de los pasos que doy en la vida.

Mis padres

Oscar Argueta Hernández y Leticia de Jesús Gálvez García, por su apoyo, amor y la paciencia que me han tenido.

**La Universidad de
San Carlos de Guatemala**

Por ser mi casa de estudios y formarme como profesional.

**Escuela Regional de
Ingeniería Sanitaria y
Recursos Hidráulicos**

Que me permitió ser parte de tan hermosa y amada escuela.

Jeffrey Estuardo Argueta Gálvez

AGRADECIMIENTOS A:

**Servicio Alemán de Intercambio
Académico (DAAD)**

Por haberme brindado la oportunidad de cursar mis estudios de maestría.

**Catedráticos de la Escuela
Regional de IngenieríaX Sanitaria
y Recursos Hidráulicos**

Por su dedicación y conocimientos brindados que serán muy útiles en mi vida profesional especialmente a los Profesores Zenón Much y Félix Aguilar

Ing. Jorge Mario

Por su apoyo en la asesoría bioquímica de nuestro proyecto

Ing. Moisés Dubón

Por su apoyo brindado en el Laboratorio Unificado de Química y Microbiología Sanitaria “Dra. Alba Tabarini Molina”.

Lic. Oscar Federico Nave

Por su apoyo en asesoría estadística y matemática para la culminación del proyecto.

Compañeros de ERIS

Por todas esas salidas para compartir momento inolvidables.

Rafael Arturo Blandón Blandón

AGRADECIMIENTOS A:

Mis hermanos

Antonio Joshua Alexander Solórzano Gálvez, Marlen Jennifer Leticia Solórzano Gálvez, quienes han sido un apoyo en todo momento, que Dios los bendiga.

Mis amigos

Por todo el apoyo que me brindaron y momentos inolvidables.

Mi asesor

Msc. Ing. Félix Alan Douglas Aguilar Carrera, por su gran ayuda y apoyo durante la elaboración del estudio.

Catedráticos de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos

Por brindarnos apoyo, tiempo y conocimientos a lo largo de nuestra formación como magister.

Ing. Zenón Much y Br. Moisés Dubón

Por la ayuda durante las pruebas y análisis dentro del laboratorio de química y microbiología.

Lic. Oscar Federico Nave

Por su apoyo en asesoría estadística y ayuda para la culminación del trabajo.

Jeffrey Estuardo Argueta Gálvez

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN.....	XIII
OBJETIVOS.....	XVII
INTRODUCCIÓN	XIX
ANTECEDENTES.....	XXI
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	XXV
Hipótesis.....	XXVII
JUSTIFICACIÓN.....	XXIX
LIMITANTES.....	XXXI
1. MARCO TEÓRICO.....	1
1.1. Aguas residuales	1
1.1.1. Aguas residuales domésticas	2
1.1.2. Composición de las aguas residuales domésticas.....	2
1.2. Ciclo del fosforo.....	4
1.3. Ciclo del nitrógeno.....	5
1.4. Eutrofización de los cuerpos receptores.....	8
1.5. Microalgas	11
1.6. Algas para remoción de nutrientes	14
1.7. Importancia del estudio de las algas	15
1.8. Modelo matemático	20

2.	METODOLOGÍA	31
2.1.	Localización y ubicación de la planta	31
2.2.	Descripción de la planta de tratamiento	32
2.3.	Número de muestras a realizar	34
2.4.	Recolección de las muestras	34
2.5.	Identificación de microalgas	35
2.6.	Conteo de microalgas	35
2.7.	Límites de nutrientes monitoreados	36
2.8.	Alteración de las muestras	36
2.9.	Colocación de las soluciones en las muestras	40
2.10.	Elaboración del modelo matemático	43
3.	RESULTADOS.....	47
3.1.	Microalgas presentes en el efluente.....	47
3.2.	Cantidad de algas encontradas.....	49
3.3.	Mínimos y máximos de nutrientes.....	53
3.4.	Remoción de nutrientes en muestras.....	54
3.5.	Modelo correlacional y ecuaciones predictivas	56
4.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	57
4.1.	Especies de microalgas encontradas.....	57
4.2.	Cantidad de algas encontradas.....	58
4.3.	Mínimos y máximos de nutrientes.....	61
4.4.	Remoción de nutrientes en muestras.....	65
4.4.1.	Remoción de nitrógeno amoniacal	65
4.4.2.	Remoción de fosfatos.....	65
4.4.3.	Remoción de nitrato	66
4.4.4.	Remoción de nitrito	66
4.5.	Elaboración de modelo matemático	67

4.5.1.	Análisis univariado de varianza de amonio.....	67
4.5.2.	Análisis univariado de varianza de fosfato.....	69
4.5.3.	Análisis univariado de varianza de nitrato	72
4.5.4.	Análisis univariado de varianza de nitrito.....	75
4.5.5.	Análisis de modelos.....	79
4.5.6.	Ecuaciones del modelo correlacional	83
4.5.7.	Ecuaciones del modelo predictivo para remoción de nutrientes.....	84
4.5.8.	Ecuaciones del modelo predictivo	85
CONCLUSIONES		91
BIBLIOGRAFÍA.....		97
APÉNDICE.....		103
ANEXOS.....		145

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Ciclo del fósforo	5
2.	Ciclo del nitrógeno	8
3.	Localización del sistema de tratamiento.....	31
4.	Croquis de la planta de tratamiento	33
5.	Diagrama de alteraciones	37
6.	Preparación de soluciones	40
7.	Colocación de muestras a diferentes concentraciones	42
8.	Colocación de muestras a diferentes concentraciones	42
9.	Crecimiento de algas clorofitas al séptimo día	43
10.	Base de datos para elaboración de modelo SPSS	45
11.	Algas Microsistis	47
12.	Algas Chlorella	48
13.	Algas Closteropsis	48
14.	Algas Sphaerocystis.....	49
15.	Algas Navícula	49
16.	Microsistis encontrada en estudios previos.....	57
17.	Chlorella Sp. encontrada en estudios previos.....	58
18.	Crecimiento de Chlorella Sp.....	59
19.	Crecimiento de Sphaerocystis.....	60
20.	Crecimiento de Closteriopsis.....	60
21.	Crecimiento de Microsistis	61
22.	Valores registrados de fosfato.....	63
23.	Valores registrados de amonio.....	63

24.	Valores registrados de nitrito	64
25.	Valores registrados de nitratos	64
26.	Porcentaje de remoción amonio vs concentraciones de fosfato y amonio.....	68
27.	Porcentaje de remoción fosfato vs concentraciones de nitritos, amonio, fosfato y nitratos.....	71
28.	Porcentaje de remoción nitratos vs concentraciones de nitritos, amonio, nitratos y fosfato.....	75
29.	Porcentaje de remoción nitritos vs concentraciones de nitratos, fosfatos, amonio y nitritos	79
30.	Variabilidad entre las correlaciones F1 Y F2	81
31.	Coeficientes canónicos estandarizados.....	82
32.	Coeficientes canónicos no estandarizados.....	82
33.	Representación de las correlaciones F1 y F2 con las variables	83
34.	Gráfico de puntos para realizar modelo de % de remoción amonio	86
35.	Gráfico de puntos para realizar modelo de % de remoción fosfato	87
36.	Gráfico de puntos para realizar modelo de % de remoción nitratos	88
37.	Gráfico de puntos para realizar modelo de % de remoción nitritos.....	89

TABLAS

I.	Composición típica de las aguas residuales	3
II.	Composición típica del agua residual doméstica en ciudad de Guatemala	3
III.	Cantidad de solución vertida.....	41
IV.	Cantidad de Chlorella Sp. día 1 – día 6	50
V.	Cantidad de Chlorella Sp. día 7 – día 12	50
VI.	Cantidad de Sphaerocystis. día 1 – día 6	51
VII.	Cantidad de Sphaerocystis. día 7 – día 12	51

VIII.	Cantidad de Closteriopsis. día 1 – día 6.....	51
IX.	Cantidad de Closteriopsis día 7 – día 12.....	52
X.	Cantidad de Micrositis Sp. día 1 – día 6.....	52
XI.	Cantidad de Micrositis Sp. día 7 – día 12.....	52
XII.	Valores de nutrientes del día 1.....	53
XIII.	Valores de nutrientes del día 2.....	53
XIV.	Valores de nutrientes día 3	54
XV.	Valores promedio de nutrientes	54
XVI.	Remoción de nitrógeno amoniacal.....	54
XVII.	Remoción de fosfatos.....	55
XVIII.	Remoción de nitratos	55
XIX.	Remoción de nitrito	55
XX.	Pruebas de efectos intersujetos de amonio	67
XXI.	Resumen de análisis de remoción de amonio con concentración amonio y concentración de fosfatos	68
XXII.	Pruebas de efectos intersujetos de fosfatos.....	69
XXIII.	Resumen de análisis de remoción de fosfatos con concentración de nitritos, amonio, nitratos y concentración de fosfato	70
XXIV.	Pruebas de efectos intersujetos de nitratos	72
XXV.	Resumen de análisis de remoción de nitrato con concentración fosfato, amonio, nitritos y concentración de nitratos	73
XXVI.	Pruebas de efectos inter-sujetos nitrito	76
XXVII.	Resumen de análisis de remoción de nitrito con concentración de nitratos, fosfatos, amonio y concentración de nitritos.....	77
XXVIII.	Datos estadísticos descriptivos	80
XXIX.	Matriz de correlaciones	80
XXX.	Valores propios	81
XXXI.	Parámetros del modelo	85
XXXII.	Estadísticos de bondad de ajuste para % de remoción de amonio.....	86

XXXIII.	Estadísticos de bondad de ajuste para % de remoción de fosfato	87
XXXIV.	Estadísticos de bondad de ajuste para % de remoción de nitratos	88
XXXV.	Estadísticos de bondad de ajuste para % de remoción de nitritos.....	89

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
A.R	Aguas residuales
NH₃	Amonio
Q	Caudal
Co₂	Dióxido de carbono
PO₃	Fosfato
P	Fósforo total
g	Gramos
g/l	Gramos por litro
Kg	Kilogramos
L	Litro
µm	Micras
Mg	Miligramo
Mg/l	Miligramo por litro
MI	Mililitro
No₃	Nitrato
No₂	Nitrito
N	Nitrógeno total
O	Oxígeno
Od	Oxígeno disuelto
PH	Potencial de hidrógeno
t	Tiempo
UV	Ultravioleta

GLOSARIO

Aguas residuales	Desperdicios líquidos y sólidos transportados por agua provenientes de viviendas, establecimientos industriales y comerciales.
Amonio	Los iones amonio son un producto tóxico de desecho del metabolismo en los animales. En los peces e invertebrados acuáticos, se excreta directamente en el agua.
Clorofitas	Son una división de algas verdes que incluye alrededor de 8 200 especies de organismos eucariotas en su mayoría acuáticos fotosintéticos.
Covariable	Variable de la que se desconoce con certeza si tiene influencia sobre otra, si actúa de forma independiente o dependiente.
Desviación estándar	Medida estadística que define cuán separados están los datos en su conjunto.
Efluente	Descarga producida, por un ente generador de caudal.
Eutrofización	Proceso natural y antropogénico en el cual se enriquecen las aguas con nutrientes por la

descomposición de materia orgánica. Crecimiento y presencia de microalgas.

Fosfato

Los fosfatos son las sales o los ésteres del ácido fosfórico. Tienen en común un átomo de fósforo rodeado por cuatro átomos de oxígeno en forma tetraédrica.

Linealidad

Relación directa de una variable sobre otra.

Microalga

Microorganismos microscópicos de entre 2 y 200 μm , fotosintéticos, polifiléticos y eucariotas.

Muestreo

Obtener una parte representativa del agua en estudio, según los parámetros para analizar.

Nitrato

Es una forma de nitrógeno en su última fase, producidas por desechos humanos.

Nitrito

Los nitritos aparecen por oxidación biológica de las aminas y del amoníaco, o por reducción del nitrato en condiciones anaeróbicas

Normalidad

Distribución normal estadística de un conjunto de datos.

RESUMEN

En el presente estudio se realizó un modelo matemático para evaluar los niveles de remoción de nutrientes en aguas residuales previamente tratadas. Para eso fue necesario tomar muestras de aguas en el efluente del último filtro percolador de la planta de tratamiento de la Universidad de San Carlos de Guatemala, con lo cual se observaron los parámetros que interfieren directamente con el crecimiento de las algas.

Los prototipos utilizados fueron frascos de vidrio totalmente transparentes, los cuales fueron instalados en el techo del laboratorio del edificio T-5, y estuvieron expuestos a radiación solar durante 12 días; después fueron vertidos con muestra de agua residual con valores mínimos de los nutrientes analizados: nitrito, nitrato y fosfato, en sus concentraciones máximas y mínimas registradas por la planta de tratamiento anteriormente mencionada.

A los 12 días, se realizaron los análisis de las diferentes concentraciones de nutrientes de que inicialmente se tenían datos, y se obtuvieron diferentes concentraciones de los diferentes nutrientes; estas se compararon con los valores iniciales en donde se obtuvo un máximo promedio de remoción: de amonio un 41.78%, de fosfatos un 40,42 %, de nitratos un 53 %, de nitritos un 64,52 %

Para el estudio fue necesario la identificación y el conteo de algas, que crecían de los prototipos en cada uno de los días acumulados cuando estos se encontraban expuestos al sol: Al realizar los estudios de las microalgas se pudieron identificar diferentes tipos de algas clorofitas, el tipo predominante fue

la Chlorella; se estima que su crecimiento exponencial según el conteo realizado periódicamente es a los 12 días de exposición al sol.

Se logró identificar y realizar el conteo de los diferentes tipos de algas clorofitas, dentro de los cuales se encontró y se contaron las siguientes; Chlorella, con un crecimiento exponencial a los 12 días; Microsistis, Sphaerocystis, Closteriopsis y Navícula, todas estas con un crecimiento exponencial a los 7 días, para posteriormente entrar en una etapa de decaimiento.

Para la realización del modelo estadístico se aplicaron programas informáticos como lo son el IBM SPSS y el XL Stat, en los cuales se analiza diferentes modelos para determinar cuál es el que se adecua mejor al comportamiento de los niveles de remoción de nutrientes por las algas clorofitas, en especial de la alga predominante Chlorella.

Se determinaron 4 ecuaciones que definen el comportamiento de la remoción para cada uno de los nutrientes. La correlación entre las variables es cercana a 1 y están dadas por las concentraciones de los 4 nutrientes para determinar el porcentaje de remoción del nutriente estudiado:

- $\% \text{ remoción amonio} = -0,97610385297762 + 3,23638430215705 * \text{Amonio} - 0,2242056082 * \text{Fosfatos} + 0,228997815081206 * \text{Nitratos} - 20,0071967 * \text{Nitritos}$.
 $\% \text{ remoción fosfatos} = 142,869537738514 - 1,38498241235932 * \text{Amonio} - 5,3896397339E-02 * \text{Fosfatos} - 1,05585539 * \text{Nitratos} + 10,5815161413 * \text{Nitritos}$.
 $\% \text{ remoción nitratos} = -19,6221544068 - 0,34759913 * \text{Amonio} + 9,37059324778E-02 * \text{Fosfatos} + 0,56217683123565 * \text{Nitratos} - 4,73756582157699 * \text{Nitritos}$.
 $\% \text{ remoción nitritos} = -$

874,128445012166+73,4299427994858*Amonio-1,958391753*Fosfatos-
13,359797744*Nitratos+1122,277887*Nitritos

OBJETIVOS

General

Elaborar un modelo matemático para determinar el nivel de eficiencia de remoción de nutrientes, a través del uso de algas clorofitas luego de la salida de tratamiento de filtros percoladores en plantas de tratamiento de aguas residuales.

Específicos

1. Identificar los factores que influyen en la variable respuesta y proponer un modelo experimental que represente dicha relación.
2. Realizar ensayos de laboratorio para construir el modelo experimental de la eficiencia de nutrientes.
3. Realizar un análisis correlacional multivariable para relacionar las variables identificadas.
4. Identificar los diferentes tipos de algas que crecen de forma natural ante la exposición solar en los dispositivos a utilizar.

INTRODUCCIÓN

Existen diferentes tipos de nutrientes encontrados dentro del agua residual, desde grandes a pequeñas concentraciones, llegando a ser perjudiciales para cuerpos de agua receptores, razón por la cual existen varias maneras de remover estos nutrientes.

Las algas clorofitas son empleadas en la eliminación de sustancias tóxicas, como pesticidas, herbicidas, metales pesados, entre otros, debido a su resistencia y capacidad de acumular importantes concentraciones de compuestos tóxicos, sin afectar su actividad biológica. A nivel industrial se han patentado diversos procesos tecnológicos para el tratamiento de efluentes industriales, o bien, para la recuperación de metales preciosos (oro y plata), mediante el empleo de los sistemas enzimáticos de las algas clorofitas.¹

En lo referente a las aguas residuales, las algas clorofitas son ampliamente utilizadas en el tratamiento de diversos tipos de efluentes (doméstico, agrícola, industrial, entre otros). Estos líquidos de desecho son un medio adecuado que favorece la proliferación rápida, gracias a su tolerancia a elevadas concentraciones de nutrientes (N y P), y materia orgánica (hasta 11 440 mg/l de DQO).²

Ciertos estudios se basan en remover los nutrientes que se encuentran disueltos en el agua residual, principalmente: fosfatos, nitrito, nitrato y amonio, a través de algas clorofitas por medio de la ingesta que se produce específicamente en este proceso de comensalismo, luego de la fase realizada en los filtros percoladores en campos de producción de biomasa. Estas algas aparecen y crecen de forma natural en los sistemas de tratamiento de sistemas de aguas residuales y subsisten por los nutrientes de los cuales se alimentan.

¹ REDALJE, Jack. *Aplicaciones de las microalgas: estado de la técnica*. p. 52.

² SALAZAR GONZÁLEZ, Margarita. *Sistemas integrales de tratamiento de aguas residuales, mediante el uso combinado de digestión anaerobia y microalgas*. p.20.

Teniendo esta problemática de eutrofización de cuerpos receptores de aguas tratadas solo por tratamientos secundarios, con exceso o presencia de nutrientes suficientes para causar el crecimiento masivo de algas, nace la necesidad de elaborar un modelo matemático. Este debe fundarse en un diseño experimental de regresión para poder predecir la cantidad de nutrientes (a los 12 días de recibir radiación solar) presentes en el agua residual, la cual será vertida luego del tratamiento secundario, en el caso de este estudio, en los filtros percoladores de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

ANTECEDENTES

La utilización de microalgas para remoción de nutrientes ha sido estudiada por más de 50 años, en obras como: Abalde *et al.*, 1995; Andrade *et al.*, 2009; Becker, 1994; EPA, 1999; Hanumatha-Rao *et al.*, 2011; Hoffmann, 1998; Larsdotter, 2006; Lavole y de la Noüe, 1985; Mendez-Suaza *et al.*, 2011; Olguin, 2003; Sandbank y Hepher 1978; Shi *et al.*, 2007). Se ha comprobado que la biomasa algal obtenida tiene un alto contenido de proteínas, lípidos, carbohidratos, y otros productos de valor agregado. Por lo tanto, los esfuerzos para cultivar este tipo de microorganismos en aguas residuales han buscado conseguir un doble beneficio, la producción de biomasa para diferentes usos y un efluente limpio con una tecnología relativamente simple.³

“Existen estudios sobre la eliminación de nutrientes de aguas residuales mediante sistemas de inmovilización pero limitados a *Chlorella* con alginato⁴ *Scenedesmus obliquus* inmovilizado en k-carragenina⁵ y “*Scenedesmus intermedius* inmovilizada en alginato de calcio.”⁶ “Estos estudios han evaluado sólo la calidad del efluente final, y pocos han determinado el nitrógeno. Se determinaron estudios de tasas de crecimiento de *Chlorella vulgaris* y *S. obliquus* sobre las aguas residuales urbanas; se analizaron la capacidad de eliminación de N-NH₄ y P-PO₄ en aguas libres y células inmovilizadas en reactores con contenido de proteínas y lípidos en cada especie, de igual forma se evaluó la

³ HERNÁNDEZ PÉREZ, Alexis

⁴ Ibid.

⁵ CHEVALIER, Isabelle; NOUE, Abdel Raouf. *Oilgae Guide to Algae-based Wastewater Treatment*.

⁶ RUIZ, Marin. *Immobilization of Microalgae Scenedesmus ovalternus (Scenedesmaceae) and Chlorella vulgaris (Chlorellaceae) in Calcium Alginate Beads*. p. 448.

vialidad de cultivos semicontinuos utilizando células inmobilizadas en perlas de alginato con recalcificación prolongando la estabilidad de la matriz.”⁷

Se ha evaluado la eficiencia de reducción de nitrógeno amoniacal, fósforo total y Demanda Química de Oxígeno (DQO), en agua residual sintética y semisintética, utilizando una cepa axénica de *nostoc sp.* y un consorcio microbiano, inmobilizados en perlas de alginato de calcio y en suspensión. Tras un período de 21 días de tratamiento, se observó, para el agua residual semisintética que el cultivo inmobilizado de *nostoc sp.* presentó la mayor eficiencia de reducción de nitrógeno y fósforo, mientras que para el agua residual sintética, no existió una reducción de nitrógeno con respecto a la concentración inicial del mismo con ninguno de los tratamientos, y la mayor reducción de fósforo fue observada en el cultivo inmobilizado del consorcio microbiano a través de evaluación de dos métodos para la reducción de nitrógeno, fósforo y DQO de aguas residuales, mediante un cultivo axénico de cianobacterias y un consorcio microbiano, inmobilizados y en suspensión.⁸

El estudio de especies como *Chlorella sp.* y *Scenedesmus sp.* es común para la remoción de nitrógeno, fósforo y DQO de aguas residuales urbanas. Por ejemplo, el estudio de Maracaibo, Venezuela, en este estudio se evaluó el uso de *Chlorella sp.* y *Scenedesmus sp.*, para la remoción de N-NH₄⁺, PPO₄ y DQO de las aguas residuales del sistema de estabilización de la Universidad del Zulia. Los experimentos se realizaron en agua residual esterilizada y no esterilizada en relación a un control con agua destilada y medio de cultivo de alga. La remoción máxima de P-PO₄ para *Chlorella sp.* fue del 44,0 % en agua residual esterilizada y del 48,7 % en agua residual no esterilizada para *Scenedesmus sp.* La remoción de DQO para *Scenedesmus sp.* fue 55,8 % en agua residual esterilizada al final del experimento; mientras que *Chlorella* alcanzó un máximo del 54,8 % en agua residual no esterilizada a las 24 horas. Los resultados mostraban que ambas especies de microalgas ofrecen una buena alternativa para el tratamiento de las aguas residuales.⁹

⁷ RUIZ, Marin. *Immobilization of Microalgae Scenedesmus ovalternus (Scenedesmaceae) and Chlorella vulgaris (Chlorellaceae) in Calcium Alginate Beads.* p. 448.

⁸ MORENO JIMÉNEZ, M. Pilar. *Remoción de fosforo y nitrogeno en aguas residuales utilizando un reactor discontinuo secuencial.* p. 26.

⁹ CHACÓN, Carmen. *Uso de Chlorella sp. y Scenedesmus sp. en la remoción de nitrógeno, fósforo y dco de aguas residuales urbanas de maracaibo, Venezuela.* p. 36.

“El empleo de las microalgas para la depuración de aguas residuales ha sido promovido desde finales de la década de los cincuenta.”¹⁰ “En los años 70 se desarrollaron en los Estados Unidos sistemas abiertos de cultivo de microalgas para el tratamiento de aguas residuales, donde se transformaba la biomasa obtenida en metano.”¹¹ “Sin embargo, este sistema de tratamiento ha visto frenada la extensión de su uso debido a la gran superficie de terreno que necesita, y a la extensión de otros sistemas como el de fangos activados. Las algas son empleadas en numerosas partes del mundo para el tratamiento de aguas residuales, pero a pequeña escala.”¹²

En Latinoamérica también existen estudios acerca de bioremediación a través de la evaluación de tasas de crecimiento de *Scenedesmus quadricauda* cultivada en efluentes domiciliarios como el estudio realizado en la ciudad de Trelew, Chubut, Argentina. Se observó una disminución en amoníaco, fósforo, fósforo en total, DBO₅ y DQO, lo que confirma la efectividad en la remoción de nutrientes en aguas residuales de naturaleza orgánica. Por ello, *S. quadricauda* se plantea como una posible alternativa de bajo costo para la descontaminación de aguas residuales urbanas, en respuesta a la creciente problemática frente al tratamiento de aguas residuales y su posible reutilización, removiendo los contaminantes, manteniendo el ecosistema y disminuyendo costos.¹³

Una de las desventajas de la eliminación de nutrientes usando algas como tratamiento biológico es la producción de biomasa en suspensión, llevando a los productores e investigadores a dar como respuesta la aplicación de una serie de filtros o compuestos químicos. Otro método es la inmovilización, siendo usado en estudios de evaluación de sistemas de microalgas y bacterias para la eliminación de nutrientes de las aguas residuales domésticas. En investigaciones del Instituto Politécnico de Ciencias Marinas de La Paz se utilizaron algas del género *Chlorella* (*C. vulgaris* y *C. sorokiniana*) inmovilizadas en esferas de alginato de sodio con la bacteria promotora de crecimiento *Azospirillum brasilense*, para la eliminación de nutrientes de las aguas residuales domésticas. Los principales resultados obtenidos fueron el crecimiento de las especies de *Chlorella* gracias a *A. brasilense Cd*; la eliminación de nitrógeno y fósforo fue superior en los sistemas coinmovilizados de los dos microorganismos, en comparación con la microalga sola. Los porcentajes de eliminación en ARD fueron de 100 % para amonio, 94 % para nitrato y 92 % para fósforo en un período de 6 días (lo que varió con la

¹⁰ ASTURIAS, Oswald. *Aplicaciones de microalgas. estado de la técnica.* p. 52.

¹¹ Op. cit. p. 59.

¹² *Ibíd.*

¹³ *Ibíd.*

fuelle de ARD); comparado con un 75 % de amonio, 84 % de nitrato y 89 % de fósforo, eliminados por la microalga inmovilizada sola .¹⁴

Además de los estudios y experimentos con algas en que muchas veces se da la presentación de inoculación de especies no autóctonas, también se da el cultivo para remoción de nutrientes en aguas residuales domésticas con algas autóctonas de la zona y con condiciones climáticas del medio natural, así como provenientes de un tratamiento anaerobio, como es el caso los experimentos de la Universidad Politécnica de Valencia; en este estudio se comprobaba la vialidad de cultivo de microalgas autóctonas con aguas residuales provenientes de un tratamiento anaerobio con obvia presencia de nutrientes y un bajo contenido de materia orgánica, lo que lo hace en principio apropiado para un tratamiento posterior mediante el cultivo de microalgas.¹⁵

¹⁴ ASTURIAS, Oswald. *Aplicaciones de microalgas. estado de la técnica. p. 52.*

¹⁵ *Ibíd.*

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En el vertido de aguas residuales tratadas, los nutrientes como nitritos, nitratos, fósforo y amonio revisten una gran importancia. Los vertidos que contienen estos nutrientes en exceso provocan el proceso de eutrofización de los cuerpos receptores de lagos y embalses, estimulando el crecimiento de algas y plantas acuáticas arraigadas en cursos de agua poco profundos. La presencia de estas plantas en los cuerpos receptores puede interferir con los usos beneficiosos de los recursos hídricos.

Por otra parte, la elevada concentración de nutrientes en efluentes tratados puede ocasionar otros efectos negativos: la reducción de la concentración de oxígeno disuelto en las aguas receptoras; toxicidad para la vida acuática; efectos negativos sobre la efectividad de la desinfección con cloro; peligro para la salud pública y efectos sobre el potencial de un agua residual para ser reutilizada.

Además de resultar estéticamente desagradable, la presencia de algas y plantas acuáticas puede interferir con los usos beneficiosos de los recursos hidráulicos, especialmente cuando se emplean para el abastecimiento de agua, crecimiento ictiológico y usos recreativos. Por lo tanto, el control del nitrógeno y del fósforo está ganando importancia en la gestión de la calidad del agua y en el proyecto de las plantas de tratamiento.¹⁶

Para limitar la cantidad de los nutrientes vertidos se han empleado varios sistemas de tratamiento basados en el uso de sistemas químicos, físicos y en ciertos casos biológicos. En un principio los procesos más empleados eran la

¹⁶ METCALF, Eddy. *Ingeniería de Aguas Residuales. Tratamiento, Vertido y Reutilización*. p. 36.

nitrificación biológica para la oxidación y el control del amoníaco, así como la desnitrificación biológica con la adición de metanol para eliminación de fósforo.

Con frecuencia en comunidades pequeñas con tratamientos primarios sus efluentes se vierten en pequeñas parcelas de tierra o en cuerpos receptores sin ningún tratamiento, puede dar origen a diversos problemas y malos olores. Por lo tanto, lo que es necesario proporcionar un tratamiento al efluente, con el propósito de disminuir los riesgos de contaminación y de perjuicio a la salud pública.

HIPÓTESIS

¿Se puede elaborar y desarrollar un modelo matemático para determinar la eficiencia de remoción de nutrientes usando algas clorofitas luego de los filtros percoladores en los sistemas de tratamientos de aguas residuales?

JUSTIFICACIÓN

La simbiosis de bacterias y algas clorofitas, en un proceso para el tratamiento de aguas residuales, se denomina lagunas de alta tasa de oxidación, donde la oxidación bacteriana de la materia orgánica genera nutrientes en forma disponible (inorgánica), los cuales van a ser fácilmente asimilables por las células algales, produciendo oxígeno. Este queda disponible a través del proceso fotosintético para la oxidación continua de nuevos desechos, de esta manera los nutrientes son aprovechados y absorbidos por las algas, favoreciendo la máxima remoción de nutrientes y reduciendo la intensidad de la eutrofización en las aguas de desecho.¹⁷

Con esta investigación se pretende elaborar un modelo matemático en el que se refleje el porcentaje de remoción de nutrientes según la composición del agua residual proveniente de tratamiento secundario, y así utilizar dicha ecuación para modelos de tratamiento con niveles de parámetros similares a los de la planta monitoreada. Existen diversos estudios acerca de la remoción de nutrientes con algas clorofitas orientados a la producción de biomasa o biocombustible, y en menor proporción a la fitoremediación de cuerpos estáticos receptores de aguas residuales.¹⁸

Para llegar a sintetizar esta ecuación se realizaron los análisis de laboratorio para evaluar la remoción de los nutrientes después de los filtros percoladores. Dichos datos se introdujeron en bases sistémicas como SPSS, por ejemplo, para determinar las variaciones de los parámetros analizados.

¹⁷ (Ibarra. 2008)

¹⁸ NARASIMHAN, Anand Murali. *Microalga bioeredation of nutrientes in waste water and carbon dioxide en flue gas*. p. 48.

Se pretende que el modelo matemático pueda determinar la eficiencia con que podrá remover nutrientes, con base en las características del agua según la presencia de fosfatos, nitritos, nitratos y amonio, el tiempo de retención con el que las algas tendrán que removerlos.

Con esto se evaluó la importancia de las algas clorofitas como implementación para un tratamiento posterior a los filtros percoladores, para disminuir las cantidades de nutrientes que pueden existir en el agua residual tratada en fase secundaria, además de darle un valor agregado al crecimiento de algas clorofitas como posible elemento potencial para un reactor de biomasa una vez iniciado el proceso de decaimiento.

LIMITANTES

Las condiciones climáticas con las que el día a día prevalece en la ciudad de Guatemala, es decir que no se trabajó en un ambiente controlado en cuanto a radiación ni a temperatura.

El modelo matemático fue adaptado a rangos de nutrientes presentes en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Los dispositivos recibían radiación solar a nivel de todo el volumen de la masa de agua, ya que eran de vidrio y no de un modelo a escala tipo laguna o carrusel, como comúnmente se produce biomasa a escala industrial.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Aguas residuales

“Las aguas residuales (AR) son las aguas usadas y los sólidos que por uno u otro medio se introducen en los sumideros y son transportadas mediante el sistema de alcantarillado. La generación de aguas residuales es una consecuencia de las actividades diarias humanas, estas actividades modifican las características y la calidad del agua, contaminándolas y poniendo en riesgo la salud pública y al medio ambiente.”¹⁹

Las aguas residuales son el agua gastada o usada que contiene sólidos disueltos o suspendidos como los contaminantes, microbios o nutrientes. Las aguas residuales que se descargan en los cuerpos de agua son peligrosas para el medio ambiente y causan diversos problemas de salud en los seres humanos. “La eutrofización es uno de esos problemas del medio ambiente causado por el vertido de aguas residuales ricas en nutrientes en los cuerpos de agua cercanos. Varios métodos de tratamiento, comúnmente químicos y biológicos convencionales, se utilizan para eliminar los nutrientes (fósforo y nitrógeno) de las aguas residuales. Sin embargo, el alto costo y la mayor producción de lodos, son los principales inconvenientes que limitan su uso y, por tanto, los investigadores se centran ahora en microalgas para la eliminación de nutrientes de las aguas residuales, ya que es menos costoso y resulta en una menor producción de lodos.”²⁰

¹⁹ ROJAS, Romero. *Vertimientos* . p. 78.

²⁰ SRIRAM, Susan. *Microalgae cultivation in wastewater for nutrient removal*. p. 45.

1.1.1. Aguas residuales domésticas

Los caudales y características de las aguas residuales en comunidades difieren notablemente de los sistemas de grandes dimensiones. Por lo tanto, para el diseño de instalaciones que sirvan a residencias individuales, urbanizaciones y pequeñas comunidades, es fundamental conocer los caudales y características previsibles de las aguas residuales a tratar.²¹

Las aguas residuales de las casas, provenientes de áreas residenciales, son definidas como aguas residuales domésticas; sus características son relativamente constantes. Las aguas residuales domésticas de una residencia son aproximadamente las mismas de cualquier otra residencia del área de una región o de un país.²²

1.1.2. Composición de las aguas residuales domésticas

La composición de las aguas residuales se refiere a las cantidades de constituyentes físicos, químicos y biológicos presentes en este tipo de aguas. Las aguas residuales se determinan por su composición física, química y biológica, pero existen parámetros preestablecidos para fijar los principales componentes que ayudan a la caracterización de las aguas, tal como se muestra en la tabla I.²³

²¹ PÉREZ, Wilber; PERALTA, Ivis. *E.D.A.R. para una población de más de 100.000 habitantes equivalentes mediante Fangos Activos*. p. 45.

²² MCKINNEY, Alex Manuel. *Tratamiento de aguas residuales*. p. 25.

²³ PÉREZ LOPEZ, José; ESPIGAREZ GARCÍA, María. *Aguas residuales composición*. p. 78.

Tabla I. **Composición típica de las aguas residuales**

Contaminante	Unidades	Concentración		
		Débil	Media	Alta
Sólidos totales	mg/l	350	720	1 200
Sólidos sedimentables	mg/l	5	10	20
DBO ₅	mg/l	110	220	400
DQO	mg/l	250	500	1 000
Nitrógeno total	mg/l	20	40	85
Fósforo total	mg/l	4	8	15
Coliformes totales	NMP/100 cm ³	106 - 107	107 - 108	107 - 109

Fuente: METCALF, Eddy. *Ingeniería de Aguas Residuales. Tratamiento, Vertido y Reutilización*. p. 36.

En la investigación realizada por los Ing. Ivis Nohelia Peralta y Wilber Javier Pérez en el año 2015 se recopiló información disponible en 29 tesis de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos (ERIS). Estos estudios fueron desarrollados en la planta experimental de tratamiento de aguas residuales “Ing. Arturo Pazos Sosa” entre 1974 y 2013. Esto permitió conocer la composición promedio de un agua residual doméstica en la ciudad de Guatemala. A continuación se muestran los resultados:

Tabla II. **Composición típica del agua residual doméstica en ciudad de Guatemala**

Parámetro	Unidad	Concentración		
		Mínimo	Media	Máximo
DBO ₅	mg/l	89	248	600
DQO	mg/l	123	412	859
Color Aparente	UC	21	400	1 900
pH	U Ph	6,7	7,5	9,1
Nitrógeno total	mg/l	12	40	63
Fósforo total	mg/l	3	12	30
Sólidos Suspendidos	mg/l	28,00	253	986

Fuente: WILBER PÉREZ, Ivis Peralta, *E.D.A.R. para una población de más de 100.000 habitantes equivalentes mediante Fangos Activos*. p. 45.

1.2. Ciclo del fósforo

Su presencia es importante porque es un elemento imprescindible en la síntesis de materia orgánica en el mar y es muy utilizado por el fitoplancton (plancton vegetal). La escasez de fosfatos en zonas de actividad fotosintética limitaría la productividad primaria, sobre todo en el verano, incidiendo directamente en toda la vida acuática.

En la descomposición bacteriana de los cadáveres, el fósforo se libera en forma de ortofosfatos (PO_4H_2) que pueden ser utilizados directamente por los vegetales verdes, formando fosfato orgánico (biomasa vegetal). A su vez, los vegetales son consumidos en los diversos niveles tróficos por animales herbívoros, formando biomasa animal que a su vez es utilizada por los animales carnívoros.

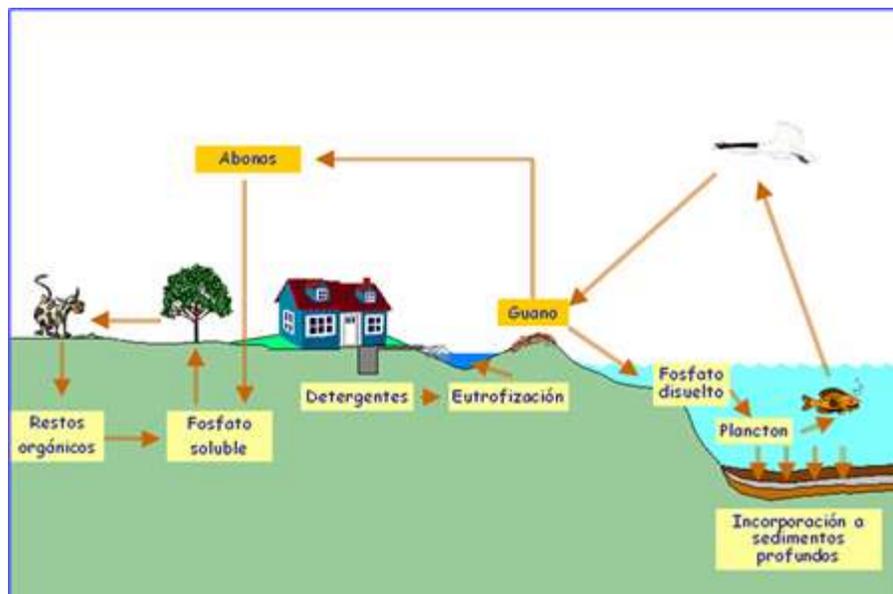
El fitoplancton (plantación microscópica del mar) capta al fósforo disuelto en el agua del mar y lo incorpora en su interior. También puede ser captado por las algas y otras plantas del fondo marítimo.

Cuando los seres vivos mueren, o a partir de sus excretas, los restos son mineralizados por las bacterias dando lugar a ortofosfato y a fosfato orgánico, soluble o disuelto, que puede ser reutilizado por los vegetales cerrando la cadena.

El fósforo juega un papel importante en el desarrollo de la vida en el seno del agua, ya que si por una parte es imprescindible para el desarrollo de la misma, por otra, cuando su concentración aumenta, actúa de inhibidor del desenvolvimiento de ciertas especies. Es el factor limitante del crecimiento más importante del ecosistema. El fósforo es un factor limitante principal de los organismos acuáticos.

La concentración de nutrientes como el fósforo determina la distribución, abundancia o escasez de una y otras especies.

Figura 1. **Ciclo del fósforo**



Fuente: Ramade. *Elementos de ecología aplicada*. p. 85.

1.3. **Ciclo del Nitrógeno**

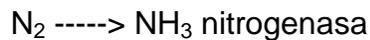
La atmósfera es la principal reserva de nitrógeno, pues este gas constituye un 78 % de la misma. Sin embargo, como la mayoría de los seres vivos no pueden utilizar el nitrógeno atmosférico para elaborar aminoácidos y otros compuestos nitrogenados, dependen del nitrógeno presente en los minerales del suelo. Por lo tanto, a pesar de la gran cantidad de nitrógeno en la atmósfera, la escasez de nitrógeno en el suelo constituye un factor limitante para el crecimiento de los vegetales.

El proceso a través del cual circula nitrógeno por mundo orgánico y el mundo físico se denomina ciclo del nitrógeno.

Este ciclo consta de las siguientes etapas:

- Fijación del nitrógeno

Consiste en la conversión del nitrógeno gaseoso (N_2) en amoníaco (NH_3), forma utilizable para los organismos. En esta etapa intervienen bacterias (que actúan en ausencia de oxígeno), presentes en el suelo y en ambientes acuáticos, que emplean la enzima nitrogenasa para romper el nitrógeno molecular y combinarlo con hidrógeno.



- Nitrificación

Proceso de oxidación del amoníaco o ion amonio, realizado por dos tipos de bacterias: Nitrosomonas y Nitrobacter. Este proceso ocurre en dos etapas:

- Un grupo de bacterias, las Nitrosomonas y Nitrococcus, oxidan el amoníaco a nitrito (NO_2^-):



- Otro grupo de bacterias, Nitrobacter, transforman el nitrito en nitrato, por este motivo no se encuentra nitrito en el suelo, que además es tóxico.



- Asimilación

Las raíces de las plantas absorben el amoníaco (NH_3) o el nitrato (NO_3^-), e incorporan el nitrógeno en proteínas, ácidos nucleicos y clorofila. Cuando los animales se alimentan de vegetales consumen compuestos nitrogenados vegetales y los transforman en compuestos nitrogenados animales.

- Amonificación

Consiste en la conversión de compuestos nitrogenados orgánicos en amoníaco; se inicia cuando los organismos producen desechos como urea y ácido úrico, sustancias que son degradadas para liberar como amoníaco el nitrógeno en el ambiente abiótico. El amoníaco queda disponible para los procesos de nitrificación y asimilación. El nitrógeno presente en el suelo es el resultado de la descomposición de materiales orgánicos y se encuentra en forma de compuestos orgánicos complejos como proteínas, aminoácidos, ácidos nucleicos y nucleótidos, que son degradados a compuestos simples por microorganismos (bacterias y hongos) que se encuentran en el suelo. Estos microorganismos usan las proteínas y los aminoácidos para producir sus propias proteínas y liberan el exceso de nitrógeno en forma de amoníaco (NH_3) o ion amonio (NH_4^+).

- Desnitrificación

Es el proceso que realizan algunas bacterias ante la ausencia de oxígeno, degradan de nitratos (NO_3^-) liberando nitrógeno (N_2) a la atmósfera, a fin de utilizar el oxígeno para su propia respiración. Ocurre en suelos mal drenados. A pesar de las pérdidas de nitrógeno, el ciclo se mantiene gracias a la actividad

de las bacterias fijadoras de nitrógeno, capaces de incorporar el nitrógeno gaseoso del aire a compuestos orgánicos nitrogenados.

Figura 2. **Ciclo del Nitrógeno**



Fuente: F Ramade *Elementos de ecología aplicada*. p. 36.

1.4. **Eutrofización de los cuerpos receptores**

El término Eutrofía se originó a partir del adjetivo alemán eutrophe, el cual refería la riqueza de nutrientes en una cierta región; Naumann, fue quien introdujo el concepto general de oligotrofía y eutrofía, tomando como referencia la poca o gran existencia de algas planctónicas en el lugar de estudio, donde el primer término refería a los lagos que contenían pocas algas planctónicas en una región dominada por rocas primarias. Un lago eutrófico era todo lo contrario, ya que el mismo contenía una gran riqueza en fitoplancton, en regiones bajas y fértiles, donde existía una gran actividad humana que a su vez proporcionaba e incrementaba la cantidad de nutrientes. En 1925, Thienemann

adoptó el concepto de Naumann y estudió a las especies de ambos tipos de lagos caracterizándolos desde el punto de vista biológico; por ejemplo, en el agua hipolimnética de los lagos eutróficos existían especies que requerían bajas concentraciones de oxígeno.

Etimológicamente, del griego, se puede hacer referencia a que oligotrófico significa poco alimentado y eutrófico, bien alimentado.

Actualmente es posible hablar de una eutrofización cultural, determinada por la intervención del hombre, quien debido a su necesidad de extensión transforma su entorno. Las descargas de aguas servidas, por ejemplo, son una de las más antiguas causas de la eutrofización cultural, ya que estas son ricas en nutrientes y contribuyen al cambio trófico del cuerpo receptor; otro ejemplo son los excesos de fertilizantes, los cuales son ricos en fósforo, sean estos naturales o químicos. La deforestación también influye en la carga de nutrientes, ya que los escurrimientos al pasar por una tierra que no tiene protección, lavan la capa fértil y se llevan consigo los nutrientes de la misma.

La demanda de agua de buena calidad en el mundo aumenta día a día, en muchos países industrializados y en vías de desarrollo se sufre de este problema, en muchos casos la evaporación excede a la precipitación y es entonces que surge la escasez, aun más en lugares donde se tiene un balance positivo, debido a los cambios climáticos, es difícil predecir la cantidad de agua disponible. En muchos países el problema de la eutrofización se hace patente sobre todo en áreas densamente pobladas, lo cual produce una mayor producción de aguas servidas. A veces los sistemas de alcantarillado y de tratamiento no son lo suficientemente efectivos, por lo cual se produce una contaminación de las fuentes y en consecuencia se atrae una problemática que incide en la calidad y en los costos del agua tratada. Se debe hacer notar que la

calidad de agua no es afectada por el aumento de la concentración de nutrientes o de la productividad del lago, sino por los efectos resultantes de estos aspectos.

Los síntomas y efectos de la eutrofización son los siguientes:

- Aumento de la producción y biomasa de fitoplancton, algas asociadas y macrofitas.
- Modificación de las características del hábitat debida a la transformación del conjunto de plantas acuáticas.
- Sustitución de especies ícticas deseables (por ejemplo, salmónidos en los países occidentales) por otras menos cotizadas.
- Producción de toxinas por determinadas algas.
- Aumento de los gastos de operación de los sistemas públicos de abastecimiento de agua, además de problemas de gusto y olor, especialmente durante los períodos de proliferación de algas.
- Desoxigenación del agua, especialmente al finalizar las situaciones de proliferación de algas, lo que normalmente da lugar a una mortandad de peces.
- Colmatación y obstrucción de los canales de riego por las malas hierbas acuáticas (el jacinto acuático puede presentar problemas de introducción, no necesariamente de eutrofización).
- Reducción de las posibilidades de utilización del agua para fines recreativos, debido al lodo, infestación de malas hierbas y olores molestos producidos por la descomposición de las algas.
- Impedimentos a la navegación debido al crecimiento de densas masas de malas hierbas.
- Pérdida económicas debidas a la modificación de las especies ícticas, mortandad de peces, entre otras.

1.5. Microalgas

“Las microalgas son organismos unicelulares fotosintéticos que captan luz solar, CO₂ y nutrientes del medio para producir biomasa; por tanto, pueden aprovecharse en emprendimientos industriales con fines tales como mejoramiento del tratamiento de efluentes convencional, es fijación de CO₂ y producción de biomasa para biocombustibles.”²⁴

Las microalgas, organismos autótrofos que ocupan el primer eslabón en la cadena trófica, han recibido mucha atención en los últimos años, especialmente en las regiones tropicales y subtropicales, en donde se emplean como un biosistema alternativo para la remoción de nutrientes de aguas residuales. Estos microorganismos incorporan nitrógeno en forma de amonio que es utilizado para formar aminoácidos; aunque también tienen la capacidad de incorporarlo en forma de nitrato.²⁵

Las clorofitas o algas verdes son un grupo (división) importante de algas clorofitas, que deben su color a la clorofila (sobre todo clorofila a y b), carotenoides y xantofilas presentes en su estructura. Son también capaces de provocar florecimientos o *blooms*. La clase más destacada de clorofitas son las clorofíceas, entre las que a su vez destacan los órdenes de las volvocales (organismos de agua dulce provistos de 46 flagelos) y las clorococales (microorganismos desprovistos de flagelos). Algunas de las algas clorofitas más estudiadas son:²⁶

- **Scenedesmus:** clorofícea clorococal. Es un alga colonial, donde 2, 4 u 8 células alargadas se unen. A menudo presentan espinas en los extremos. Es común en aguas dulces y salobres en condiciones de nutrientes medias altos.
- **Chlorella:** clorofícea clorococal especialmente conocida por su capacidad de eliminar nutrientes del agua. Se desarrolla por tanto en medios ricos

²⁴ CHACÓN, Carmen. *Uso de Chlorella sp. y Scenedesmus sp. en la remoción de nitrógeno, fósforo y DQO de aguas residuales urbanas de maracaibo, Venezuela.* p. 36.

²⁵ Contreras, 1994; de la Noüe *et al.*, 1992; Jeanfils *et al.*, 1993).

²⁶ MARTÍNEZ, Ruiz. *Puesta en marcha de un cultivo de microalgas para la eliminación de nutrientes de un agua residual urbana previamente tratada anaeróticamente.* p. 27.

en nutrientes. Es conocida por ser una de las algas clorofitas de más rápido crecimiento. Es esférica y su diámetro oscila normalmente entre las 2 y 10 μm . Contiene clorofila a y b.

- Rodofitas o algas rojas: son representativas del medio marino, encontrándose pocas en aguas dulces. Sus pigmentos fotosintéticos incluyen tres tipos de ficobilinas que les confieren su color característico.

Dentro de las algas clorofitas se encuentran:

- Micrositis Sp: una colonia de células esféricas. Cada celda no está cubierta con una vaina, sino que se dispersan dentro de una matriz gelatinosa. La distancia entre las células es generalmente más corta que su diámetro.²⁷
- Chlorella Sp: es un género de algas verdes unicelulares del filo Chlorophyta. Tiene forma esférica, midiendo de 2 a 10 μm de diámetro, y no posee flagelo. Chlorella contiene los pigmentos verdes fotosintetizadores clorofila -a y -b en su cloroplasto.²⁸
- Closteriopsis: tallo unicelular no incluido en el sobre el mucílago. Las células miden entre 10 y 240 x 1 y 6,5 micras, son rectas o curvas, la mayoría de las formas con puntas alargadas y puntiagudas. Las células tienen paredes celulares suaves, uninucleadas; cloroplastos central o parietal, de cinta, banda o en forma de espiral retorcida.²⁹

²⁷ SERVER, Silvia. *Cianobacterias Planctónica*. p. 82.

²⁸ DENISTSKI, Alexe. Volvox. es.wikipedia.org, s.f. Consulta: agosto de 2015.

²⁹ CHODAT, Ramon. *Algues pélagiques nouvelles*. p. 96.

- Sphaerocystis: "colonias esféricas con 4 ó 32 células embebidas en extenso mucílago. Las células esféricas de 4 a 16 metros de diámetro, agrupadas en mucílagos en grupos de cuatro o más o menos disperso. Células con paredes celulares lisas."³⁰

Navícula Sp: una diatomea esbelta y delicada que lleva la fragilidad en su nombre y una fina cabeza en sus dos extremos.

"El cultivo de cianobacterias en aguas residuales ofrece dos ventajas simultáneas, la primera, el tratamiento de dichas aguas y, por otra parte, la posibilidad de producir biomasa que posteriormente podría ser explotada en forma de complementos proteínicos, aditivos alimenticios o farmacéuticos, energía como biogás y combustibles, fertilizantes y otros valiosos químicos."³¹

Las algas clorofitas constituyen una de las principales materias primas para biocombustibles que pueden proporcionar soluciones a temas de energía alternativa y contaminación ambiental. Tienen un gran potencial para la eliminación del exceso de nitrógeno y fósforo en estado inorgánico de aguas residuales, incluyendo la escorrentía agrícola. Pueden capturar el dióxido de carbono en el gas de combustión de centrales eléctricas de carbón, reduciendo así el gas de efecto invernadero y también la producción de biomasa de algas, que se puede convertir en biocombustible.

El fósforo y el nitrógeno son los principales nutrientes para el crecimiento de las algas clorofitas, estos están presentes en las aguas residuales tanto domésticas como de escorrentías superficiales agrícolas. La descarga de estas

³⁰ CHODAT, Ramon. *Algues pélagiques nouvelles*. p. 100.

³¹ MALLICK, Alexander. *Residuos Sólidos Urbanos - Producción biológica de hidrógeno a partir de residuos*. p. 56.

aguas a los cuerpos receptores sin tratar ocasionan, por el exceso mismo de nutrientes, una eutrofización del cuerpo de agua. Gracias a las bondades bioquímicas que poseen es que se proponen las algas para eliminar el nitrógeno y el fósforo de forma inorgánica presente en las aguas residuales, además de promover otros beneficios como el aumento del pH del agua y la liberación de oxígeno gracias a la fotosíntesis que se produce.

“El agua residual representa un medio apropiado para el crecimiento de cianobacterias,”³² “pues posee bicarbonatos, nitratos y fosfatos, los cuales son tres aniones para los que estas han desarrollado mecanismos altamente eficientes para tomar y retener,”³³ “razón por la que han sido consideradas como una alternativa para el tratamiento de aguas residuales.”³⁴

1.6. Algas para remoción de nutrientes

El de aguas residuales es un concepto general que se utiliza para representar el agua de mala calidad que contiene gran cantidad de contaminantes y microorganismos patógenos. Si las aguas residuales se descargan en los cuerpos de agua cercanos, pueden causar serios problemas ambientales y de salud a los seres humanos.³⁵

El primer paso en el método de tratamiento de aguas residuales es el tratamiento primario que elimina los sólidos, el aceite y la grasa de estas. El tratamiento secundario o tratamiento biológico es el segundo paso, que explota microorganismos para eliminar los productos químicos presentes en las aguas residuales. El paso final es el tratamiento terciario, que elimina los microbios de las aguas residuales antes de su descarga al río.³⁶

El efluente producido a partir de la planta de tratamiento secundario contiene más cantidad de nutrientes (nitrógeno y fósforo), y si estos efluentes se descargan en los cuerpos de agua provocan eutrofización y afectan el

³² ABALDE, Gerddo. *Crecimiento de microalgas marinas con diferentes productos zeolíticos*. p. 45.

³³ BUCXADÉ, Ernst. *Guía para el mejoramiento de la calidad del agua a nivel casero*. p. 63.

³⁴ CHACÓN, Carmen. *Uso de Chlorella sp. y Scenedesmus sp. en la remoción de nitrógeno, fósforo y dco de aguas residuales urbanas de maracaibo, Venezuela*. p. 36.

³⁵ SRIRAM, S. *Microalgae cultivation in wastewater for nutrient removal*. p 45.

³⁶ Rawat et al., (2010).

ecosistema. Para eliminar estos nutrientes se utilizan varios procesos, pero las desventajas de este tipo de tratamiento son el alto costo y el aumento de la producción de lodos.³⁷

“Las microalgas se sugieren para eliminar los nutrientes de las aguas residuales, como una alternativa a los métodos de tratamiento convencionales.”³⁸ El uso de microalgas o macroalgas (algas marinas) para eliminar los contaminantes y nutrientes de las aguas residuales se llama Fitoremediación. “El tratamiento de aguas residuales con microalgas es ecológico y ofrece la ventaja de una manera rentable de la producción y eliminación de nutrientes de la biomasa.”³⁹ Las microalgas cultivadas en aguas residuales se pueden utilizar como fuente de energía, fertilizantes, producción de química fina y como pienso para animales.

1.7. Importancia del estudio de las algas

El cultivo de algas ha sido objeto de estudio durante las últimas décadas debido al interés suscitado tanto por su capacidad para combatir el efecto invernadero (eliminar el CO₂ de corrientes gaseosas industriales) como para la obtención de productos de valor añadido (nutrición, farmacia, química fina, entre otros) y, principalmente, como fuente alternativa a los combustibles fósiles tradicionales (producción de biodiesel, biometano, biohidrógeno y bioetanol).

A continuación se realiza un detalle de los usos e investigaciones en cada uno de estos campos:

³⁷ YUAN, Vicent. *Sistema de reducción de lodos en tratamientos de aguas residuales*. p. 85.

³⁸ MALLICK, Alexander. *Residuos Sólidos Urbanos - Producción biológica de hidrógeno a partir de residuos*. p. 56.

³⁹ MULBRY, Alexis José. *Microalgas, cultivo y beneficios*. p. 41.

- Energía

Podría decirse que una de las principales preocupaciones actuales es la búsqueda de fuentes de energía sustitutas o complementarias al petróleo, dado el pronóstico del agotamiento de las reservas del planeta y los problemas derivados de su uso: emisiones de efecto invernadero, subida de los precios, inestabilidad de los mercados por dependencia energética de países productores, entre otros.

Existen, sin embargo, además de dicha conversión química, otras posibilidades de aprovechamiento energético de las microalgas, de modo similar a como se aprovechan otros tipos de biomasa del planeta (residuo forestal, residuo orgánico urbano y otros): mediante conversión termoquímica, química o bioquímica.

- Biodiesel

El biodiesel es un combustible líquido obtenido a partir de lípidos mediante procesos de esterificación y transesterificación. Estos lípidos provienen de grasas animales o de aceites de diversos cultivos, como los de soja (en la actualidad la materia prima más empleada), maíz, girasol, palma, colza, remolacha, jatropha y otros. El principal problema de estas materias primas vegetales es la necesidad de grandes extensiones de tierra para su cultivo y la competencia con productos de alimentación, lo que ha generado en los últimos años un amplio debate sobre su sostenibilidad económica, medioambiental y social.

Numerosas especies de microalgas pueden ser inducidas, manipulando las características físicas y químicas del medio de cultivo, para producir elevadas cantidades de lípidos o ácidos grasos, que pueden ser posteriormente empleados para la producción de biodiesel. Estas

manipulaciones pueden ser simples, como variación de la salinidad, temperatura, pH o disponibilidad de micronutrientes. La acumulación de lípidos se atribuye a un consumo de azúcares mayor al crecimiento celular, que favorece la conversión a lípidos de los azúcares en exceso. Sin embargo, y por regla general, las microalgas con alto contenido lipídico no presentan altas velocidades de crecimiento. Es por ello que lo que se busca optimizar es la producción neta de lípidos por unidad de volumen de reactor o de superficie ocupada. Las ventajas del empleo de algas para la obtención de biodiesel son principalmente las siguientes:

- No compite en el mercado de productos de alimentación.
 - La producción no es estacional por dependencia con las cosechas.
 - El consumo de agua es menor.
 - La superficie necesaria para su cultivo es mucho menor: empleando aceite de colza se producen alrededor de 1 190 L biodiesel/ha de cultivo, mientras que en el caso de las algas se pueden obtener hasta 12 000 L/ha.
 - Su alta velocidad de crecimiento en comparación con los cultivos tradicionales (la productividad por unidad de superficie es entre de 20 y 40 veces mayor en el caso de las algas).
 - Eliminación del empleo de herbicidas y pesticidas.
- Depuración

La fitoremediación, en términos generales, es el empleo de plantas para la eliminación o transformación de contaminantes, incluyendo por ejemplo nutrientes presentes en el agua o el CO₂ presente en gases de escape. La

fitoremediación lleva asociada una producción de biomasa, ya sea ésta plantas superiores (filtros verdes, entre otros), macroalgas o microalgas.

Una de las primeras descripciones del empleo de algas en el tratamiento de aguas residuales se remonta a 1957 y se debe a Oswald, quien describe un sistema de tratamiento mediante lagunaje. Las algas han ido ganando atención desde entonces debido a su potencial de eliminación de nutrientes de aguas residuales urbanas, industriales, y de la agricultura.⁴⁰

“Junto a los cultivos de algas en suspensión, otros autores han investigado la depuración de aguas residuales mediante algas fijas en medios como alginato o quitosán, o mediante biofilms.”⁴¹

Se han probado tanto monocultivos como cultivos de varias especies en aguas residuales artificiales y reales, de modo que investigaciones paralelas han concluido, sobre un extenso número de especies de microalgas, que estas son aptas para la eliminación de contaminantes en aguas residuales y que la eficacia del proceso es prometedora. Los resultados muestran porcentajes de eliminación que alcanzan el 100 % en algunos casos, aunque obviamente varían en función de las condiciones de operación, especies empleadas, y características del agua residual. Otros estudios han trabajado con aguas de elevada carga orgánica, ya sea de ganadería o agricultura, concluyendo asimismo que la depuración mediante microalgas es posible.

Algunas de las especies estudiadas son *Phormidium*, *Botryococcus*, *Chlamydomonas*, *Scenedesmus obliquus*⁴² *Spirulina platensis*⁴³ y “*Chlorella*

⁴⁰ OLGUIN, Ana. *Puesta en marcha de un cultivo de microalgas para la eliminación de nutrientes de un agua residual urbana previamente tratada anaeróbicamente*. p. 94

⁴¹ ABE, Ana; TAKAHASHI, Zoe. *Reuse of effluent water from a municipal wastewater treatment plant in microalgae cultivation for biofuel production*. 96 p.

sp.⁴⁴ Estas especies pueden utilizar en su crecimiento diferentes compuestos de nitrógeno tales como amonio, nitrato o urea.

Asimismo, numerosos estudios se han centrado en el secuestro del CO₂ por parte de las algas, debido al efecto invernadero del gas y al hecho de que las microalgas y cianobacterias pueden fijar CO₂ con una eficiencia entre 10 y 50 veces mejor que las plantas terrestres.

- Otros productos

La producción a escala industrial de algas para usos no energéticos comenzó en los años sesenta en Japón con el cultivo de *Chlorella* para aditivo en alimentación. Este consumo se extendió a países como los Estados Unidos, India, Israel o Australia. El consumo de microalgas para alimentación está sin embargo restringido a unas pocas especies debido a la estricta regulación en materia de alimentos. El mercado está dominado por *Chlorella*, *Dunaliella* y *Spirulina* en forma de comprimidos o en polvo, si bien es cierto que existen estudios que relacionan el consumo de cianobacterias con varias enfermedades del sistema nervioso.

Las microalgas son una fuente importante de ácidos grasos poliinsaturados, esenciales para el ser humano por, entre otras cosas, reducir el riesgo de enfermedades cardiovasculares. Estos ácidos grasos suelen obtenerse a partir de aceites del pescado. Actualmente el único disponible comercialmente a partir de microalgas es el ácido docosahexaenoico (DHA) ya

⁴² MARTÍNEZ, Margarita; PARK, Joaquín. *Aplicación e importancia de las microalgas en el tratamiento de aguas residuales*. p. 78.

⁴³ LODI, Alexis; Olguín, José Arturo. *Microalgas, cultivo y beneficios*. p. 23.

⁴⁴ HERNÁNDEZ, Julio. *Evaluación de un sistema de microalgas y bacterias para eliminación de nutrientes de las aguas residuales domésticas*. p. 52.

que la obtención de otros (eicosapentaenoico EPA, gamma linoleico GLA y araquidónico AA) no es competitiva con la producción a partir de otras fuentes.

Las microalgas se cultivan también para alimentación animal como suplementos que mejoran la respuesta inmunológica o la fertilidad, controlan el peso o el estado de las pieles de los animales. Se emplean microalgas como *Chlorella*, *Spirulina* o *Scenedesmus*, principalmente en acuicultura.

De las microalgas, sobretodo de *Dunaliella salina*, se obtiene caroteno, que tiene un amplio rango de aplicaciones como colorante, fuente de provitamina A y aditivo en cosméticos.

La microalga *Haematococcus pluvialis* produce astaxantina, que se emplea en la industria nutracéutica, cosmética, de colorantes y de alimentación. Es un potente antioxidante con posibles acciones beneficiosas en humanos como protección ante la radiación UV, precursor hormonal y del sistema inmunológico, antiinflamatorio y fuente de provitamina A.

1.8. Modelo matemático

Modelo estadístico se dice que es el empleo de modelos en un proceso consustancial al ser humano. Para comprender lo que sucede en la naturaleza, a partir de la observación detallada de los acontecimientos se elaboran modelos sobre cómo funcionan los fenómenos, pudiendo realizar, incluso, predicciones sobre ellos. En el ámbito científico, un modelo que explica un fenómeno suele expresarse de forma matemática, por lo que un modelo ha sido derivado de descripciones y probablemente será útil para predecir. McCullagh y Nelder afirman que la construcción de modelos requiere de una mezcla de arte y conocimientos por parte del investigador. Este proceso se conoce en ciencia,

como modelado matemático o modelización matemática, y cuando los fenómenos a explicar son probabilísticos, antes que determinísticos, como sucede frecuentemente en las ciencias del comportamiento, sociales y de la educación, hablamos de modelado estadístico o estocástico.⁴⁵

- Origen

El modelado estadístico, a diferencia de las aplicaciones más tradicionales centradas en el contraste de hipótesis y en las pruebas de significación, se establece a partir de la década de los 60, atendiendo a la estimación de parámetros y a la comparación y ajuste de modelos de probabilidad a los datos empíricos.⁴⁶

- Para qué sirven los modelos matemáticos

Un modelo pretende explicar la variación de una respuesta a partir de la relación conjunta de dos fuentes de variabilidad, una de carácter determinista y otra aleatoria, lo que responde a la expresión:

Respuesta = componente sistemático + componente aleatorio.

“Se toma la expresión anterior como: datos = modelo + error, asociando modelo a la parte sistemática. Así, los datos corresponderían a las observaciones que se quieren analizar, la variable de respuesta o variable dependiente.”⁴⁷

⁴⁵ LÓPEZ GARCÍA, Emelina; RUIZ SOLER, Marcos *Análisis de datos con el Modelo Lineal Generalizado. Una aplicación con R.* p. 24.

⁴⁵ JUDD, Carline; MCCLELLAND, James L. *Data analysis: A model comparison approach.* p. 74.

⁴⁶ LÓPEZ GARCÍA, Emelina; RUIZ SOLER, Marcos *Análisis de datos con el Modelo Lineal Generalizado. Una aplicación con R.* p. 37.

⁴⁷ JUDD, Carline; MCCLELLAND, James L. *Data analysis: A model comparison approach.* p. 85.

- Modelo:

Es la función que se introduce con objeto de explicar los datos (una función ponderada de una o más variables explicativas o predictores). Y, dado que la variabilidad recogida en datos no termina de estar explicada, se introduce el término error, que contiene la discrepancia o falta de ajuste entre datos y modelo (entre la realidad empírica y la explicación teórica o sustantiva).

“Es deseable que el modelo sea, por tanto, una buena representación de los datos, de forma que el error se reduzca lo máximo posible. De la construcción, formulación y ajuste de modelos a los datos empíricos se encarga precisamente el modelado estadístico, debiendo responder a tres criterios: (a) criterio estadístico o principio de bondad de ajuste: la inclusión de parámetros en el modelo en beneficio de una mejor representación de los datos con la correspondiente disminución del error;”⁴⁸ “(b) criterio lógico o principio de parsimonia: la selección de los parámetros que formen parte del modelo de tal modo que éste se convierta en una representación simple y sobria de la realidad.”⁴⁹

Esta construcción del modelo más parsimonioso que explique la variable de respuesta con el menor error posible se realiza atendiendo a estas etapas:

- Especificación del modelo teórico, determinando qué variables son de interés, así como cuáles son las relaciones entre ellas. Que el modelo describa de la forma más simple posible, o bien que la concordancia

⁴⁸ MCCLELLAND, James L. *Development and environmental threats*. p. 78.

⁴⁹ JUDD, Carline; MCCLELLAND, James L. *Data analysis: A model comparison approach*. p. 96.

entre el modelo y los datos sea lo más completa posible, es decir, con el mínimo error.

- Estimación de parámetros, calculando el valor de los coeficientes del modelo examinado a partir del conjunto de datos observados, con el objetivo de determinar si el modelo teórico propuesto es aceptable como representación aproximada de los datos.
- Selección del modelo, valorando si el nivel de discrepancia entre los datos observados y los datos ajustados es suficientemente bajo como para optar por el modelo o, por el contrario, suficientemente elevado como para rechazarlo.
- Evaluación del modelo, examinando las observaciones individuales , los datos influyentes y los datos anómalos , así como comprobando los supuestos de normalidad, linealidad, homoscedasticidad e independencia.
- Interpretación del modelo, esta fase conlleva una explicación detallada de los parámetros del modelo para comprobar si se cumplen los criterios estadístico, lógico y sustantivo.
- Finalmente se acepta o no el modelo y, si es preciso, se reinicia el proceso.

- Modelo lineal

La fórmula general del modelo lineal es:

$$Y = f(X) + g(\varepsilon)$$

Donde toda observación sobre la variable de respuesta es la suma de: (a) los efectos de un grupo de factores o componentes sistemáticos $f(X)$, que implican un conjunto de parámetros de una población y un conjunto de variables independientes relevantes, medidas sobre cada uno de los sujetos con los que se trabaja, y (b) la función $g(\varepsilon)$, que representa el efecto de los componentes aleatorios y es resultado de una o más distribuciones de probabilidad dependientes de un pequeño número de parámetros. En esta fórmula general tienen cabida una amplia variedad de modelos lineales representativos de las relaciones estadísticas entre variables explicativas y de respuesta.

Cuando se menciona el modelo lineal es conveniente señalar que la linealidad puede tener lugar de distintos modos y que, según ellos, se obtienen modelos de uno u otro tipo. Cabe considerar como modelo lineal, no obstante, todo aquel que lo sea en sus parámetros, con independencia de que sus variables explicativas cumplan esta condición o no. Se habla, entonces, de un modelo lineal de primer orden para k variables explicativas y $k+1$ parámetros si el modelo es lineal en sus parámetros y en sus variables explicativas, respondiendo a la siguiente fórmula general:

$$Y = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j X_j + \varepsilon$$

Si el modelo es lineal en sus parámetros pero no en las variables explicativas sería un modelo lineal de m -ésimo orden (cuadrático, cúbico u otros) con km variables independientes y $km+1$ parámetros. Puede incluir

componentes de interacción y ser susceptible de ser linealizado transformando sus variables explicativas. Su formulación es:

$$Y = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j X_j + \sum_{j=1}^k \beta_{j1} X_j^2 + \dots$$

Si el modelo no es lineal en los parámetros y/o en las variables explicativas puede adoptar múltiples formulaciones.

No obstante, al poderse linealizar mediante las transformaciones adecuadas suele ser tratado como modelo intrínsecamente lineal.⁵⁰ Los modelos que no se ajustan a ninguna de las anteriores situaciones son, entonces, modelos no lineales.

Si el modelo lineal es susceptible de numerosas variaciones para ajustarse a las particularidades de una investigación específica, variaciones que a nivel matemático se ven reflejadas en las relaciones existentes entre la variable de respuesta, las variables explicativas, los parámetros del modelo y el componente de error aleatorio. Sin embargo, por lo general, tres son las principales formas que el modelo lineal general puede adoptar dependiendo de la estructura métrica de las variables explicativas:⁵¹

- La forma de un modelo de regresión,
- la forma de un modelo de análisis de varianza (Anova) o de diseño experimental,
- la forma de un modelo de análisis de covarianza (Ancova) o de diseño experimental con variables concomitantes

⁵⁰ RICHARD DRAPER, Norman; SMITH, Harry . *Nonlinear models*. p. 59.

⁵¹ ATO, Manuel; VALLEJO, Guillermo. *Estudio del cosechado de cultivos de microalgas en agua residual mediante técnicas de centrifugado*. p. 78.

En los modelos de regresión las variables explicativas son de naturaleza métrica, cuantitativa continua o discreta, cumpliendo con los supuestos básicos del modelo lineal, a saber: linealidad, homoscedasticidad, normalidad e independencia de los errores.⁵² Los modelos de regresión simple, múltiple, multivariante o la correlación canónica se incluyen en este tipo de modelos.

- Construcción de modelo de regresión multivariable

Se conoce como análisis de regresión multivariante al método estadístico que permite establecer una relación matemática entre un conjunto de variables $X_1, X_2 .. X_k$ (covariantes o factores) y una variable dependiente Y . Se utiliza fundamentalmente en estudios en los que no se puede controlar por diseño los valores de las variables independientes.

Los objetivos de un modelo de regresión puede ser dos:

- Obtener una ecuación que nos permita "predecir" el valor de Y una vez conocidos los valores de $X_1, X_2 .. X_k$. Se conocen como modelos predictivos.
- Cuantificar la relación entre $X_1, X_2 .. X_k$ y la variable Y con el fin de conocer o explicar mejor los mecanismos de esa relación. Se trata de modelos explicativos, muy utilizados cuando se busca encontrar qué variables afectan a los valores de un parámetro fisiológico, o cuáles son los posibles factores de riesgo que pueden influir en la probabilidad de que se desarrolle una patología.

⁵² LÓPEZ GONZÁLEZ, Margarita. *Sistemas integrales de tratamiento de aguas residuales, mediante el uso combinado de digestión anaerobia y microalgas*. p.20.

Un problema fundamental que se plantea a la hora de construir un modelo multivariante es qué factores $X_1, X_2 \dots X_k$ se deben de incluir en la ecuación, de tal manera que se estime el mejor modelo posible a partir de los datos de estudio. Para lograr esto lo primero que habría que definir es el mejor modelo que se ajuste a los datos. Si se busca un modelo predictivo será aquél que proporcione predicciones más fiables, más acertadas; mientras que si el objetivo es construir un modelo explicativo, debe buscarse que las estimaciones de los coeficientes de la ecuación sean precisas, ya que a partir de ellas se efectúan las deducciones. El modelo debe ser lo más sencillo y entendible posible.

- Selección de variables

Es importante que en la construcción de un modelo de regresión se preste atención en la elección de variables. Los mecanismos para la selección de variables no son fáciles de especificar ya que dependen en gran medida del tipo de modelo (predictivo o explicativo), del contexto de utilización y de las propias características del proceso analizado. La única forma clara es que ante dos posibles modelos, similares en otros aspectos, se elija el que sea más sencillo y que menos suposiciones necesite para su construcción (es lo que se denomina principio de parsimonia).⁵³ Para poder decidir entre utilizar un modelo con unas determinadas variables o con otras será preciso disponer de una medida de comparación entre modelos.

En la regresión lineal se utiliza para comparar dos modelos la F parcial, que en el caso de que se contrasten dos modelos que difieren en una sola

⁵³ GARCIA, David. *Estudio del cosechado de cultivos de microalgas en agua residual mediante técnicas de centrifugado*. p. 78

variable es idéntico a utilizar el valor de la t para el coeficiente de regresión de la nueva variable.

Existen diferentes estrategias sistemáticas para la elección de variables a incluir en los modelos que se van a evaluar. Puede empezarse con un modelo con todas las variables e interacciones, en una regresión hacia atrás, a partir del cual se van eliminando variables cuya presencia no mejora la calidad del modelo según el criterio especificado. O, por el contrario, puede empezarse con una sola variable independiente e ir añadiendo aquellas variables e interacciones que mejoran significativamente el modelo, en una regresión hacia adelante. Otra alternativa, no siempre factible si el número de variables es suficientemente grande y no se dispone del software adecuado, es evaluar todos los modelos de regresión posibles con todas las combinaciones de variables.

La regresión "stepwise", traducida como *regresión por pasos*, es una versión modificada del proceso de regresión hacia adelante en la que en cada nuevo paso, cuando se incluye una nueva variable, además se reconsidera el mantener las que ya se había añadido previamente, es decir que no solo puede entrar una nueva variable en cada paso sino que puede salir alguna de las que ya estaban en la ecuación. El proceso finaliza cuando ninguna variable de las que no están en la ecuación cumple la condición para entrar y de las incorporadas a la ecuación ninguna cumple la condición para salir.

El conjunto de variables que finalmente quede incluido en la ecuación de regresión puede depender del camino seguido a la hora de seleccionarlas, salvo en el caso de que se evalúen todos los modelos de regresión posibles que obviamente solo da pie para una conclusión.

Cualquiera que sea el método que se piense utilizar para la selección de variables este debe comenzar con un cuidadoso análisis univariante de la posible relación entre la variable dependiente y cada uno de los factores estudiados.

Para este estudio, las variables que se tomarán en cuenta para el modelo estadístico a utilizar, serán de 4 variables independientes: amonio, nitrito, nitrato, fósforo y, como única variable dependiente, el porcentaje de remoción de nutrientes, removido debido al crecimiento de las algas clorofitas. Por lo que el modelo se debe adaptar a las variables independientes que sean significativas para la elaboración del mismo.

- El análisis de correlación canónica

Es un método de análisis multivariante desarrollado por Harold Hotelling. Su objetivo es buscar las relaciones que pueda haber entre dos grupos de variables y la validez de las mismas. Se diferencia del análisis de correlación múltiple en que este solo predice una variable dependiente a partir de múltiples independientes, mientras que la correlación canónica predice múltiples variables dependientes a partir de múltiples independientes. La correlación hipercanónica es una correlación lineal y, por tanto, solo busca relaciones lineales entre las variables. En este análisis, entonces, se crean combinaciones lineales de las variables originales, sobre la base de su estructura de correlación. Al diseñar el experimento hay que considerar el tamaño de la muestra ya que son necesarias un mínimo de observaciones por variable, para que el análisis pueda representar las correlaciones adecuadamente.

- La regresión de mínimos cuadrados parciales

Es un método estadístico que tiene relación con la regresión de componentes principales. En lugar de encontrar hiperplanos de mínima varianza entre la variable de respuesta y las variables independientes, se encuentra una regresión lineal mediante la proyección de las variables de predicción y las variables observables a un nuevo espacio. Debido a que tanto los datos de X e Y se proyectan a nuevos espacios, los que son familia de los modelos PLS se conoce como factores de modelos bilineales.

- Los cuadrados mínimos parciales

Es una variante que se utiliza cuando la Y es binaria. La regresión de mínimos cuadrados parciales se utiliza para encontrar las relaciones fundamentales entre las dos matrices (X e Y), es decir, un enfoque de variable latente para modelar la estructura de covarianza en estos dos espacios. Un modelo trata de encontrar el sentido multidimensional en el espacio de X que explica la dirección de la máxima varianza multidimensional en el espacio Y. La regresión de mínimos cuadrados parciales es especialmente adecuada cuando la matriz de predictores tiene más variables que observaciones, y cuando hay multicolinealidad entre los valores de X. Por el contrario, de no usarse este modelo se producirá un error estándar de la regresión en estos casos.

2. METODOLOGÍA

2.1. Localización y ubicación de la planta

La realización de esta investigación se hizo con base en las características del efluente del agua residual de los filtros percoladores de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la Universidad de San Carlos, ubicada dentro de los predios de la parte norte de los campos de la Facultad de Agronomía. Las coordenadas de ubicación son las siguientes: 14°34'43.0"N 90°33'34.1"W.

Figura 3. Localización del sistema de tratamiento



Fuente: Google Earth.

2.2. Descripción de la planta de tratamiento

La planta de tratamiento está conformada de las siguientes estructuras:

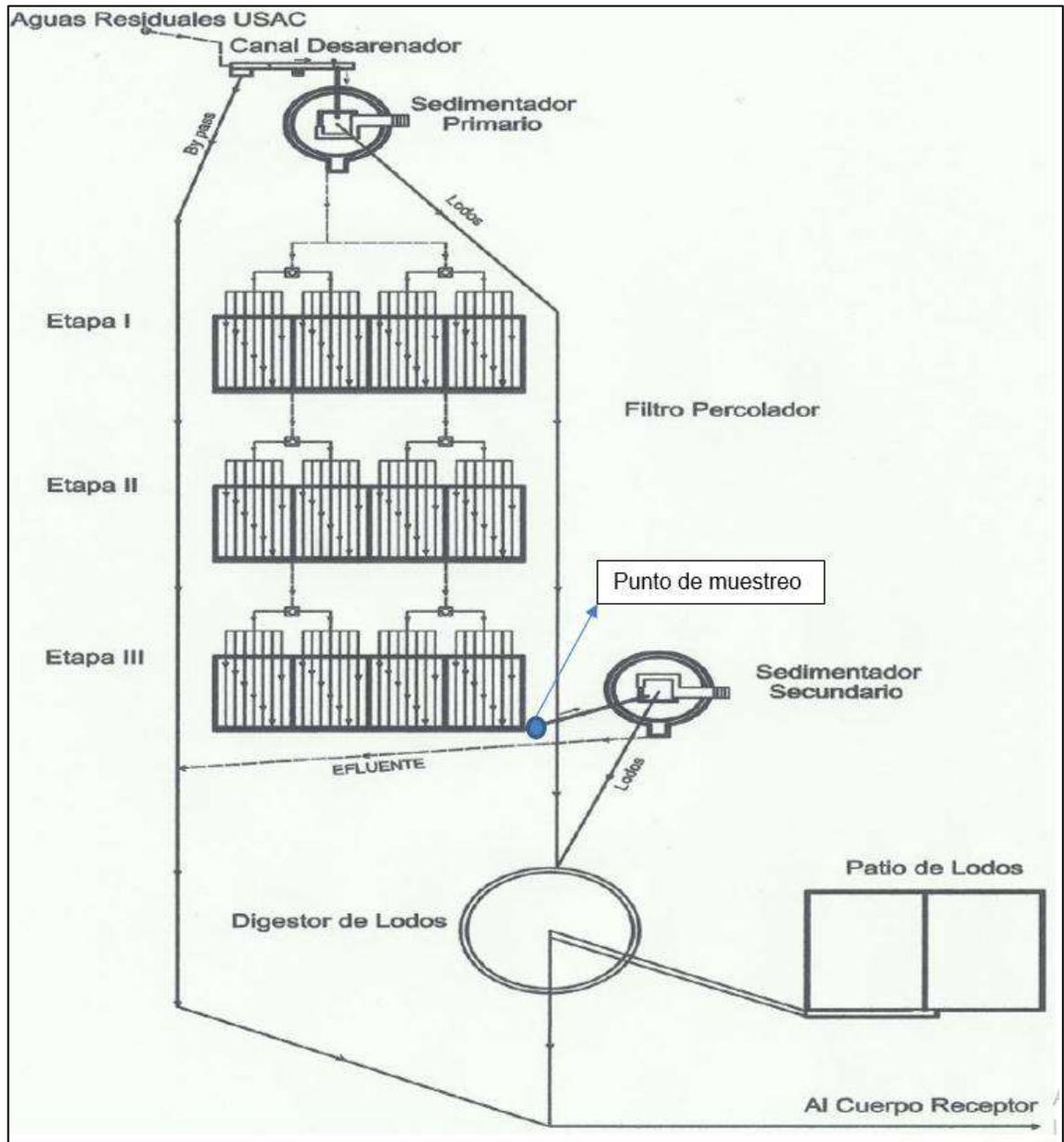
- Cámara de ingreso
- Canal de rejas
- Desarenador
- Sedimentador primario
- Módulo de filtros (tres filtros en serie)
- Sedimentador secundario
- Digestor de lodos
- Patio de secado de lodos

- El tren de operación del flujo de agua residual es el siguiente:
 - Cámara de ingreso - canal de rejas- desarenador –sedimentador primario –módulo de filtros –sedimentador secundario –cuerpo receptor.

- El tren de operación del flujo de lodos generados es el siguiente:
 - Sedimentador primario –digestor de lodos –patio de secado
 - Sedimentador primario –digestor de lodos –patio de secado

La siguiente figura muestra la distribución espacial de las diferentes unidades de tratamiento existentes en la planta de tratamiento del agua residual, e indica la ubicación donde fueron extraídas las muestras, específicamente a la salida del tercer filtro percolador.

Figura 4. Croquis de la planta de tratamiento



Fuente: Ing. Rommel Raudales, año 2011.

2.3. Numero de muestras a realizar

El tipo de diseño experimental es de tipo factorial es decir

$$\text{Nivel}^N$$

En donde:

N = variables independientes

Niveles de cada variable (máximos y mínimos)

N = 4

Niveles = 2

$$2^4 = 16 \text{ muestras}$$

Idealmente se deben realizar 3 corridas para que tengan representatividad los datos y para realizar el modelo matemático de correlación multivariable que relaciona las variables independientes con las variables dependientes.

Por lo tanto, se realizaron 48 muestras analizando las diferentes alteraciones posibles de los parámetros estudiados, además de los análisis iniciales que se deben hacer al agua recogida inicialmente. A cada una de las muestras se le realizó una determinación de los 4 nutrientes a investigar, en total se realizaron 192 muestreos.

2.4. Recolección de las muestras

La recolección de las muestras para realizar tanto la identificación de algas, el conteo de las mismas y la colección de muestras para la alteración se hizo específicamente en el efluente del tercer filtro percolador, antes de la

entrada al sedimentador secundario. La recolección en este punto se realizó por ser la fase final del tratamiento secundario, antes de ser vertido el efluente al cuerpo receptor teniendo presencia abundante de nutrientes.

2.5. Identificación de microalgas

Lo primero a realizarse en esta investigación es asegurarse de la presencia y crecimiento de microalgas en el agua residual usada para la realización del modelo. Para la identificación de las mismas se tomó muestras de agua del efluente del tercer filtro percolador y se analizaron con el microscopio del laboratorio con ayuda de una cámara de recuento Sedgewick Rafter (usándose solo de apoyo en esta fase).

Antes de realizar la fase de conteo de algas para poder ver el crecimiento de las mismas, se realizó una identificación previa de las especies de microalgas presentes en el agua residual proveniente del efluente de los filtros percoladores, para así conocer el tipo de especie con que se estaría elaborando el modelo matemático y compararla con las ya registradas y clasificadas según los textos.

2.6. Conteo de microalgas

En el año 2015, en la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria, se realizó una investigación por parte del Ing. Herber Guerra y el Ing. Mario Zea acerca de la presencia de microalgas en los efluentes del sistema de filtro de percoladores de la planta de tratamiento de la USAC. Este estudio contemplaba el conteo de algas luego de varios días de aislada una muestra de agua en un recipiente, expuesta a factores ambientales naturales. El resultado obtenido en cuanto al conteo fue que el séptimo día era el día de máximo crecimiento o *boom* y luego

el cultivo de algas iniciaba la etapa de decaimiento siempre y cuando no existan factores externos que afecten la muestra, tal es el caso de variación de carga orgánica, lluvia o radiación solar entre otros.

2.7. Límites de nutrientes monitoreados

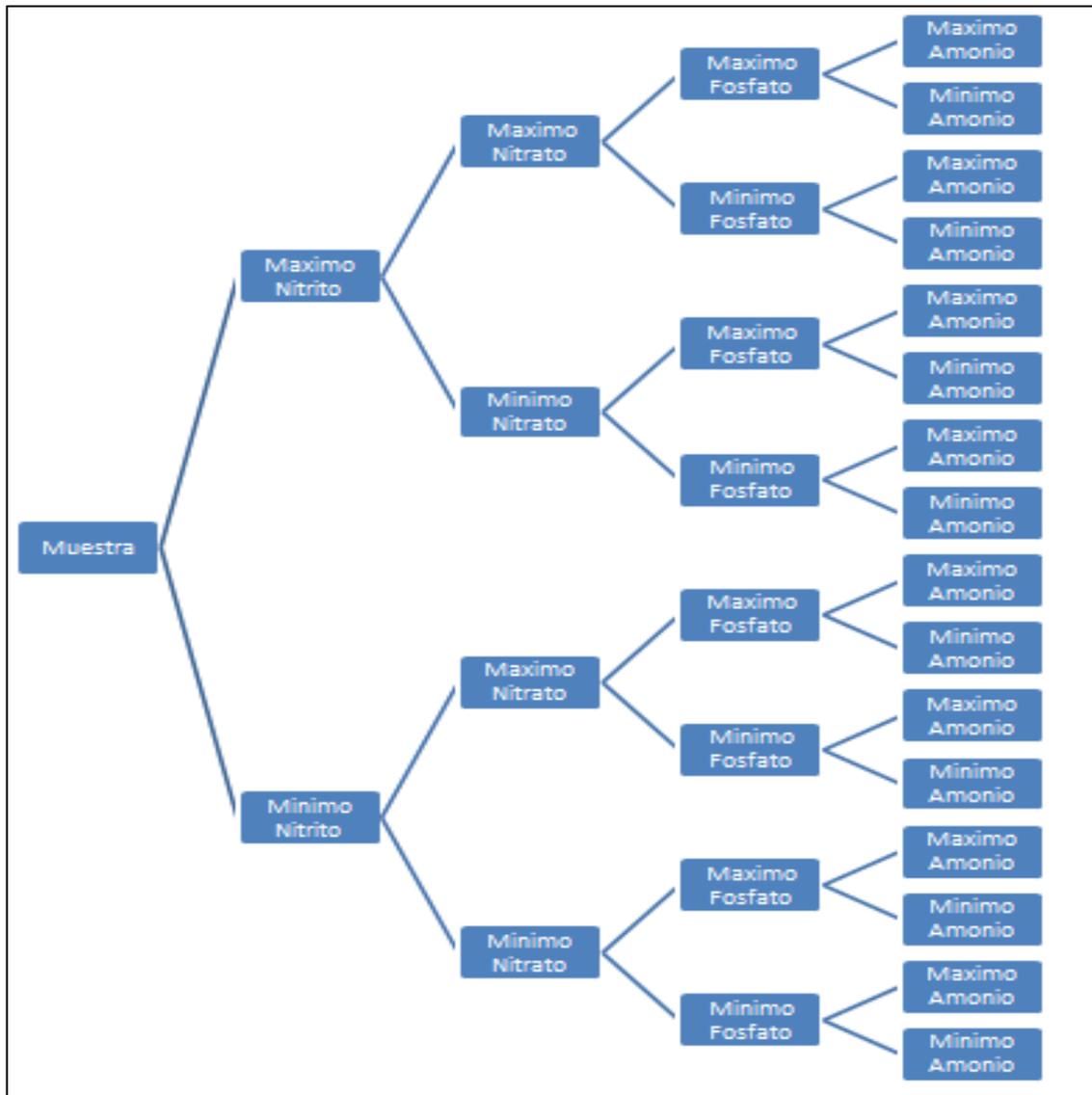
La realización del modelo requiere el conocimiento de valores mínimos y máximos de los valores de los nutrientes existentes en la salida de los filtros percoladores de la planta estudiada. Para lograrlo se realizó un monitoreo de 3 repeticiones durante 3 días iniciando desde las 8:00 de mañana hasta las 3:00 de la tarde. Los días y horarios escogidos, fueron aquellos en que mostraban la de estudiantes a la universidad, será similar para así obtener el mismo caudal y el mismo comportamiento con patrones repetitivos o similares de los valores máximos y mínimos actualizados y reales de la planta.

Para poder determinar los valores de nutrientes existentes en la planta se usó un espectrofotómetro HACH Modelo DR2500, con sus respectivas celdas de 25 ml cada una, reactivos para la determinación de nitritos, nitratos, fosfatos y amonio, también de la marca HACH, para celdas de 25 ml, y se usaron los programas 355, 390, 490 y 380, respectivamente.

2.8. Alteración de las muestras

Una vez con la muestra de agua de la planta de tratamiento ya diluida y las concentraciones en cada una de las muestras, se tomaron pruebas de confirmación para tener el mínimo común de todas y, con base en este, iniciar a llevar a los valores máximos según la necesidad de combinaciones. Las combinaciones fueron organizadas en mínimos y máximos de cada uno de los nutrientes tal como se muestra en el diagrama.

Figura 5. Diagrama de alteraciones



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.

Con los valores ya determinados y llevando el concepto del modelo aplicado a cada una de las situaciones posibles de valores, tanto mínimos como máximos, se necesito una solución con una determinada concentración de

nitratos y fosfato en estado soluble e inorgánico, para poder primero estabilizar la muestra en los niveles que se requerían. Ambas soluciones se realizaron en diferentes proporciones de concentración, una de valores mayores a 1 para lograr llevar los niveles a límites altos, y una solución de concentración más baja para poder afinar los valores ya próximos y tener una precisión más acertada.

Las soluciones usadas fueron las siguientes:

NH_4Cl en solución de 0,03819 gr diluida en 1 litro de agua destilada para poder obtener la concentración de $1\text{ ml} = 1,22\text{ mg}/NH_3$.

Y en solución de 15,65 gr diluida en 1 litro de agua destilada para poder obtener la concentración de $1\text{ ml} = 5\text{ mg}/NH_3$.

La primera concentración es para afinar las muestras una vez que se tienen estabilizados los mínimos de todos los frascos, y la segunda concentración que está más alta es para poder afinar los valores de una forma más exacta. De esta forma se hizo para las 4 soluciones en las distintas concentraciones.

KNO_3 en solución de 0,7218 gr diluida en 1 litro de agua destilada para poder obtener la concentración de $1\text{ ml} = 0,1\text{ mg}/NO_3$

Y en solución de 36,09 gr diluida en 1 litro de agua destilada para poder obtener la concentración de $1\text{ ml} = 5\text{ mg}/NO_3$

$NaNO_2$ en solución de 1,232 gr diluida en 1 litro de agua destilada para poder obtener la concentración de $1\text{ ml} = 0,25\text{ mg}/NO_2$

Y en solución de 2,464 gr diluida en 1 litro de agua destilada para poder obtener la concentración de $1\text{ ml} = 0,5\text{ mg}/NO_3$

KH_2PO_4 en solución de 21,95 gr diluida en 1 litro de agua destilada para poder obtener la concentración de $1\text{ ml} = 0,50\text{ mg}/NO_2$

Y en solución de 43,9 gr diluida en 1 litro de agua destilada para poder obtener la concentración de $1\text{ ml} = 10\text{ mg}/NO_3$

Los valores obtenidos por las soluciones fueron testeados en el espectrofotómetro, verificando de esta forma que los valores fueran correctos.

Figura 6. **Preparación de soluciones**



Fuente: Tomada por los autores.

2.9. Colocación de las soluciones en las muestras

Teniendo ya dosificadas y testeadas las soluciones se procedió a recolectar la muestra de agua a la salida del filtro percolador. Se recolectó a las 8:00 de la mañana, que es la hora con menor cantidad de nutrientes presentes en la muestra. Una vez teniendo la muestra (con valores aún más bajos que los mínimos registrados llevados a este estado a través de dilución) se procedió a llevar a los valores mínimos toda la muestra. Se hizo la homogeneización de las soluciones, la muestra de agua residual y el agua destilada en un recipiente para 20 litros.

Tabla III. **Cantidad de solución vertida**

Nutriente	Inicial (mg/l)	Final (mg/l)	Solución	Cantidad de solución (ml)
Fosfato	19	204	difosfato monosódico	18,5
Amonio	1	17,5	cloruro de amonio	3,3
Nitrato	76	116	nitrato de potasio	8
Nitrito	0,1	1,55	nitrito de sodio	2,9

Fuente: elaboración propia.

El total de muestra fue de 15 litros para trabajar 38 muestras divididas en frascos de vidrio transparente de 250 ml cada frasco y luego tener combinaciones de mínimos y máximos de contenido de nutriente. La cantidad de combinaciones obtenidas son 16, con 2 repeticiones más, para un total de 38 muestras que son las descritas con anterioridad.

Cada uno de los envases fue etiquetado con su respectiva descripción de alteraciones, alterado en base a los mínimos y elevado a su máximo según la etiqueta correspondiente y colocado en la terraza del Laboratorio de Química y Microbióloga Dra. Alba Tabarini Molina, con una posición estratégica en la que la cantidad de radiación recibida fuera aprovechada desde la salida hasta la puesta del sol.

Una vez definidas las combinaciones de máximos y mínimos entre nutrientes, y el material listo para ser expuesto, se ubicaron las muestras a recibir la radiación durante el tiempo determinado de muestreo.

Figura 7. **Colocación de muestras a diferentes concentraciones**



Fuente: elaboración propia.

Figura 8. **Colocación de muestras a diferentes concentraciones**



Fuente: elaboración propia.

Pasado los 7 días se revisaron los frascos para ver la cantidad de biomasa presente, pero se notó que unos no tenían en cantidades normales al crecimiento visiblemente promedio. El monitoreo realizado en el conteo arrojó que si bien a los 7 días se notaba el *boom* o crecimiento máximo de biomasa en cuanto a tasa de crecimiento, igual seguían creciendo pero a un ritmo más lento, razón por la cual se decidió dejar la exposición de los frascos hasta el día 12 y realizar las mediciones ese día.

Figura 9. **Crecimiento de algas clorofitas al séptimo día**



Fuente: elaboración propia.

2.10. Elaboración del modelo matemático

Para la elaboración del modelo matemático se utilizaron los programas de SPSS y de XLstat, esto con el fin de facilitar el análisis de datos, con esto se construyó una base de datos con los resultados obtenidos de los valores de nutrientes a los 12 días, para determinar el % de remoción de las 48 muestras.

El primer paso es realizar un análisis univariado de varianza para determinar si existe significatividad entre las variables independientes, en este caso nitritos, nitratos, fosfato, amonio.

Para que exista un modelo debe existir una correlación entre las variables y el resultado que se busca tener, por lo que se debe realizar un análisis de correlación canónica que brinda un modelo para determinar la correlación, dado un valor de las variables con más significatividad con las otras variables. Esto es realizado con el programa de SPSS, gráficas y valores de las variables para determinar el modelo correlacional.

Para la elaboración del modelo predictivo se utilizó el programa XLstat, el cual realizó un análisis de regresión por mínimos cuadrados parciales. Este método relaciona las variables independientes con las variables dependientes, de tal manera que se pueda realizar un modelo lineal a través de una regresión de los datos. Se obtienen las 4 diferentes ecuaciones que predicen el % de remoción de nutriente de cada uno de los nutrientes en función de los resultados obtenidos y de todas las variables.

Figura 10. Base de datos para elaboración de modelo SPSS

ConcAmon	ConcFosf	ConcNitrat	ConcNitrit	RemocAmon	RemocFosf	RemocNitrat	RemocNitrit	var
Mínima	Mínima	Mínima	Mínima	61.90	73.07	24.60	-2036.36	
Mínima	Mínima	Mínima	Mínima	42.86	84.24	12.70	-1536.36	
Mínima	Mínima	Mínima	Mínima	61.90	84.24	-38.89	-1718.18	
Máxima	Máxima	Máxima	Máxima	44.68	22.81	59.18	89.69	
Máxima	Máxima	Máxima	Máxima	40.43	22.81	48.98	79.38	
Máxima	Máxima	Máxima	Máxima	40.43	19.32	70.66	99.90	
Máxima	Máxima	Mínima	Mínima	36.17	28.63	16.67	-1263.64	
Máxima	Máxima	Mínima	Mínima	36.17	26.30	20.63	-809.09	
Máxima	Máxima	Mínima	Mínima	48.94	26.30	16.67	-172.73	
Mínima	Mínima	Máxima	Máxima	4.76	51.29	23.47	31.27	
Mínima	Mínima	Máxima	Máxima	61.90	28.37	33.67	20.96	
Mínima	Mínima	Máxima	Máxima	4.76	28.37	38.78	-3.09	
Mínima	Máxima	Mínima	Mínima	-52.38	34.45	40.48	-1718.18	
Mínima	Máxima	Mínima	Mínima	-4.76	37.94	52.38	-1627.27	
Mínima	Máxima	Mínima	Mínima	-80.95	37.94	64.29	-1263.64	
Máxima	Máxima	Máxima	Mínima	51.06	4.97	48.98	-172.73	
Máxima	Máxima	Máxima	Mínima	51.06	5.35	38.78	-627.27	
Máxima	Máxima	Máxima	Mínima	48.94	5.35	69.39	9.09	
Mínima	Mínima	Mínima	Máxima	4.76	64.18	32.54	48.45	
Mínima	Mínima	Mínima	Máxima	4.76	64.18	76.19	48.45	
Mínima	Mínima	Mínima	Máxima	4.76	62.75	52.38	96.56	
Máxima	Máxima	Mínima	Máxima	8.51	26.30	32.54	48.45	
Máxima	Máxima	Mínima	Máxima	-112.77	26.30	24.60	62.54	
Máxima	Máxima	Mínima	Máxima	44.68	26.30	52.38	72.51	
Máxima	Mínima	Mínima	Mínima	27.66	57.02	4.76	-490.91	
Máxima	Mínima	Mínima	Mínima	74.47	62.75	24.60	-309.09	
Máxima	Mínima	Mínima	Mínima	14.89	62.75	80.16	-127.27	

Fuente: elaboración propia.

3. RESULTADOS

Los resultados, tablas, gráficas y datos estadísticos que se obtuvieron mediante técnicas y experimentaciones en este estudio son mostrados de manera particular según sus fases de estudio y se desglosan a continuación.

3.1. Microalgas presentes en el efluente

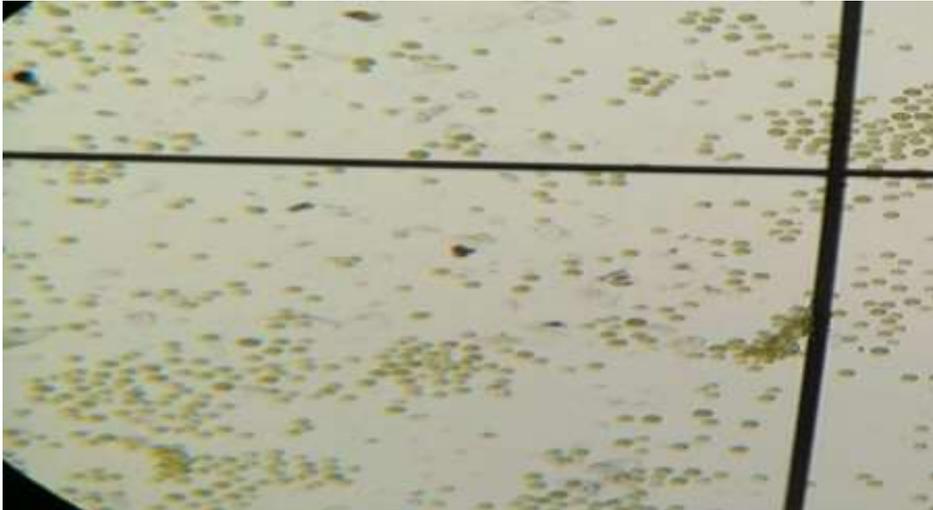
A continuación se presentan los tipos de microalgas.

Figura 11. **Algas Microsistis**



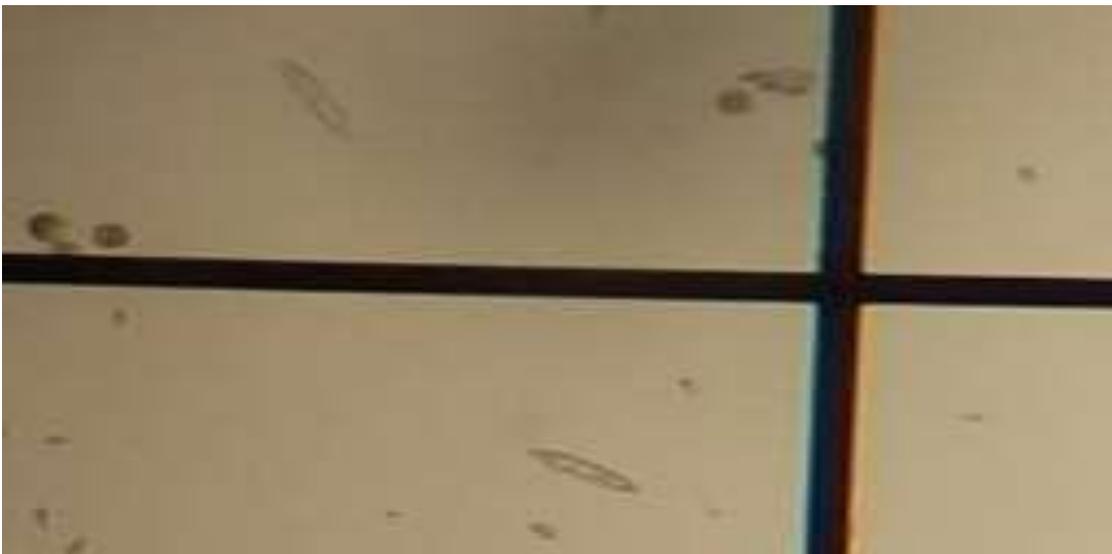
Fuente: Tomada por los autores

Figura 12. **Algas Chlorella**



Fuente: Tomada por los autores.

Figura 13. **Algas Closteropsis**



Fuente: Tomada por los autores.

Figura 14. **Algas Sphaerocystis**



Fuente: Tomada por los autores

Figura 15. **Algas Navícula**



Fuente: Tomada por el autor

3.2. Cantidad de algas encontradas

El conteo de microalgas que crecen de forma natural en esta investigación se realizó simultáneamente a 3 muestras de aguas residuales durante 12 días consecutivos para poder observar el crecimiento de las mismas y poder obtener un promedio de crecimiento, así como el día máximo de crecimiento según el tipo de microalgas observadas. La cantidad de especies dominantes fueron 4: Chlorella Sp, Sphaerocystis, Closteriopsis y Microsistis. El primer día de conteo

fue el 01 del mes de marzo del 2016, usando la cámara de recuento Sedgewick Rafter.

Los resultados de los conteos de algas de forma natural más prominentes en el conteo fueron las siguientes:

- Chlorella Sp

Tabla IV. **Cantidad de Chlorella Sp. día 1 – día 6**

Muestra	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5	Día 6
1	6 857	6 857	6 857	6 857	6 857	6 857
2	7 143	7 143	7 143	7 143	7 143	7 143
3	7 429	7 429	7 429	7 429	7 429	7 429

Fuente: elaboración propia.

Tabla V. **Cantidad de Chlorella Sp. día 7 – día 12**

Muestra	Día 7	Día 8	Día 9	Día 10	Día 11	Día 12
1	139 571	142 857	138 857	158 857	187 143	261 429
2	136 286	128 714	128 143	187 286	171 429	242 857
3	128 571	122 714	128 714	170 000	172 857	241 429

Fuente: elaboración propia.

Tabla VI. **Cantidad de Sphaerocystis. día 1 – día 6**

Muestra	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5	Día 6
1	143	286	857	857	1 286	2 571
2	286	286	1 143	1 000	1 143	571
3	143	429	1429	857	286	429

Fuente: elaboración propia.

Tabla VII. **Cantidad de Sphaerocystis. día 7 – día 12**

Muestra	Día 7	Día 8	Día 9	Día 10	Día 11	Día 12
1	7 429	6 000	2 857	1 714	1 286	571
2	8 857	4 857	3 714	1 429	571	1 429
3	7 000	6 143	4 429	2 000	1 714	714

Fuente: elaboración propia.

Tabla VIII. **Cantidad de Closteriopsis. día 1 – día 6**

Muestra	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5	Día 6
1	286	1 000	2 571	1 571	1 000	1 286
2	429	143	286	1 714	571	8 571
3	286	714	429	1 143	571	5 000

Fuente: elaboración propia.

Tabla IX. **Cantidad de Closteriopsis día 7 – día 12**

Muestra	Día 7	Día 8	Día 9	Día 10	Día 11	Día 12
1	20 000	4 571	1 286	1 714	3 000	4 143
2	24 371	4 000	1 714	2 286	2 143	857
3	19 429	8 000	2 286	1 286	2 857	4 429

Fuente: elaboración propia.

Tabla X. **Cantidad de Micrositis Sp día 1 – día 6**

Muestra	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5	Día 6
1	429	714	429	286	143	571
2	357	714	143	429	286	1143
3	429	114	143	286	143	714

Fuente: elaboración propia.

Tabla XI. **Cantidad de Micrositis Sp. día 7 – día 12**

Muestra	Día 7	Día 8	Día 9	Día 10	Día 11	Día 12
1	20 000	1 286	571	429	429	143
2	25 143	1 714	429	714	429	429
3	19 429	2 286	571	143	429	857

Fuente: elaboración propia.

3.3. Mínimos y máximos de nutrientes

Valores recolectados de la planta de tratamiento monitoreada para determinar los valores máximos y mínimos de concentración de nutrientes, en los horarios establecidos a cada hora. La recolección de las muestras de agua se realizó desde las 8:00 de la mañana hasta las 3:00 de la tarde. En ese lapso de tiempo se dan los máximo y a la vez mínimos caudales así como la repetición de patrones de actividades de la USAC resumidos en esos 3 días con la misma cantidad de estudiantes.

Tabla XII. **Valores de nutrientes del día 1**

Primer Monitoreo								
Hora (Hrs)	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00
Fosfato (mg/l)	19	55	32	204	22	106	69	50
Amonio (mg/l)	1,5	1,9	1,6	1	0,1	5	5,3	7,6
Nitrito (mg/l)	0,12	0,12	0,25	0,1	0,14	1,55	0,72	0,98
Nitrato (mg/l)	105	99	96	101	90	92	90	92

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIII. **Valores de nutrientes del día 2**

Segundo Monitoreo								
Hora (Hrs)	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00
Fosfato (mg/l)	112	40	38	29	78	50	29	32
Amonio (mg/l)	8,6	11,7	8,7	11	8,1	8,4	9,3	12,2
Nitrito (mg/l)	0,39	1,52	1,13	6,05	0,76	0,44	0,68	0,66
Nitrato (mg/l)	122	86	76	76	93	93	93	99

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIV. **Valores de nutrientes día 3**

Tercer Monitoreo								
Hora (Hrs)	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00
Fosfato (mg/l)	20	65	70	29	35	20	45	103
Amonio (mg/l)	9,6	11,5	10,2	11,7	14,3	13,3	17,5	13,3
Nitrito (mg/l)	0,12	0,23	0,33	0,57	0,76	1,18	0,99	1,14
Nitrato (mg/l)	116	112	95	93	89	102	81	94

Fuente: elaboración propia.

Tabla XV. **Valores promedio de nutrientes**

Promedio								
Hora (Hrs)	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00
Fosfato (mg/l)	50,33	53,33	46,67	87,33	45,00	58,67	47,67	61,67
Amonio (mg/l)	6,57	8,37	6,83	7,90	7,50	8,90	10,70	11,03
Nitrito (mg/l)	0,21	0,62	0,57	2,24	0,55	1,06	0,80	0,93
Nitrato (mg/l)	114,33	99,00	89,00	90,00	90,67	95,67	88,00	95,00

Fuente: elaboración propia.

3.4. Remoción de nutrientes en muestras

A continuación se explicarán la remoción de nutrientes en muestras.

Tabla XVI. **Remoción de nitrógeno amoniacal**

Muestra	NH₄(mg/l)		
	Inicial	Final	% Removido
1 Muestra	17,50	13,17	24,74
	1	1,26	Sin Remoción
2 Muestra	17,50	10,19	41,78
	1	1,06	Sin Remoción
3 Muestra	17,50	10,89	37,77
	1	1,15	Sin Remoción

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVII. **Remoción de Fosfatos**

Muestra	PO ₄ (mg/l)		
	Inicial	Final	% Removido
1 Muestra	204,00	153,22	24,90
	19	11,32	40,42
2 Muestra	204,00	155,20	23,93
	19	11,84	37,69
3 Muestra	204,00	155,20	23,98
	19	11,84	36,69

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVIII. **Remoción de Nitratos**

Muestra	NO ₃ (mg/l)		
	Inicial	Final	% Removido
1 Muestra	116,00	54,56	53,00
	76	59,56	21,64
2 Muestra	116,00	62,14	46,30
	76	55,19	26,6
3 Muestra	116,00	55,30	52,60
	76	56,17	26,1

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIX. **Remoción de Nitrito**

Muestra	NO ₂ (mg/l)		
	Inicial	Final	% Removido
Muestra 1	1,55	0,55	64,52
	0,1	1,98	Sin remoción
Muestra 2	1,55	0,75	51,62
	0,1	1,50	Sin Remoción
Muestra 3	1,55	0,87	43,88
	0,1	1,60	Sin Remoción

Fuente: elaboración propia.

3.5. Modelo correlacional y ecuaciones predictivas

A continuación se explicaran los modelos correlacional y ecuaciones predictivas.

Tabla I. **Ecuaciones del modelo correlacional**

	Combinación lineal de las x			
	Primera correlación canónica			
	$V1 = -0,107A_{monio} + 0,005F_{osfatos}$			
Equivalente a:	$V1 = -0,107x_1 + 0,005x_2$			
	Combinación lineal de las y			
	Primera correlación canónica			
	$U1 = -0,011 \%remA_{monio} + 9,602 \%remF_{osfatos} + 0,01 \%remN_{itratos} - 0,0004 \%remN_{itritos}$			
Equivalente a:	$U1 = -0,011y_1 + 9,602y_2 + 0,01y_3 - 0,0004y_4$			

Fuente: elaboración propia.

Tabla II. **Ecuaciones del modelo predictivo**

% remoción amonio = $-0,97610385297762 + 3,23638430215705 * A_{monio} - 0,224205608221564 * F_{osfatos} + 0,228997815081206 * N_{itratos} - 20,00719670879 * N_{itritos}$
% remoción fosfatos = $142,869537738514 - 1,38498241235932 * A_{monio} - 5,38963973392522E-02 * F_{osfatos} - 1,05585539721351 * N_{itratos} + 10,5815161413411 * N_{itritos}$
% remoción nitratos = $-19,6221544068836 - 0,347599135679979 * A_{monio} + 9,37059324778441E-02 * F_{osfatos} + 0,56217683123565 * N_{itratos} - 4,73756582157699 * N_{itritos}$
% remoción nitritos = $-874,128445012166 + 73,4299427994858 * A_{monio} - 1,95839175350234 * F_{osfatos} - 13,3597977447721 * N_{itratos} + 1122,27788749952 * N_{itritos}$

Fuente: elaboración propia.

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1. Especies de microalgas encontradas

A pesar de que existen más tipos de microalgas registradas en los sistemas de tratamiento de aguas residuales, las únicas vistas fueron las del tipo Cianofitas en este caso las *Microcystis* Sp, Clorofitas, ya que se encontraron *Chlorella* Sp, *Closteriopsis* y *Sphaerocystis*. En mucha menor cantidad la *Diatomea Navícula* que fue la menos observada en todas las muestras de agua, en estudios pasados se muestran las mismas especies encontradas actualmente.⁵⁴

Figura 16. **Microcystis** encontrada en estudios previos



Fuente: Herber Guerra.

⁵⁴ GUERRA, Herber. *Zea. Marioidentificación de presencia de algas generadas en los efluentes del sistema de filtros percoladores de la planta de tratamiento Ing. Arturo Pasos Sosa, para uso potencial en remoción de nitrógeno y fosforo presentes en el agua residual.* p. 85.

Figura 17. **Chlorella Sp. encontrada en estudios previos**



Fuente: GUERRA, Herber. *MarioIdentificación de presencia de algas generadas en los efluentes del sistema de filtros percoladores de la planta de tratamiento Ing. Arturo Pasos Sosa, para uso potencial en remoción de nitrógeno y fosforo presentes en el agua residual. p. 87.*

4.2. Cantidad de algas encontradas

Las cantidades de algas encontradas en las muestras monitoreadas fueron variantes. El crecimiento de microalgas se dio bajo las condiciones de radiación solar por encima de las del crecimiento óptimo, según estudios previos del ingeniero Herber Guerra. Los datos de radiación obtenidos en el estudio previo fueron tomados del Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología de Guatemala (Insivumeh). Se hace referencia a este estudio en cuanto al análisis de datos de radiación solar y nubosidad.

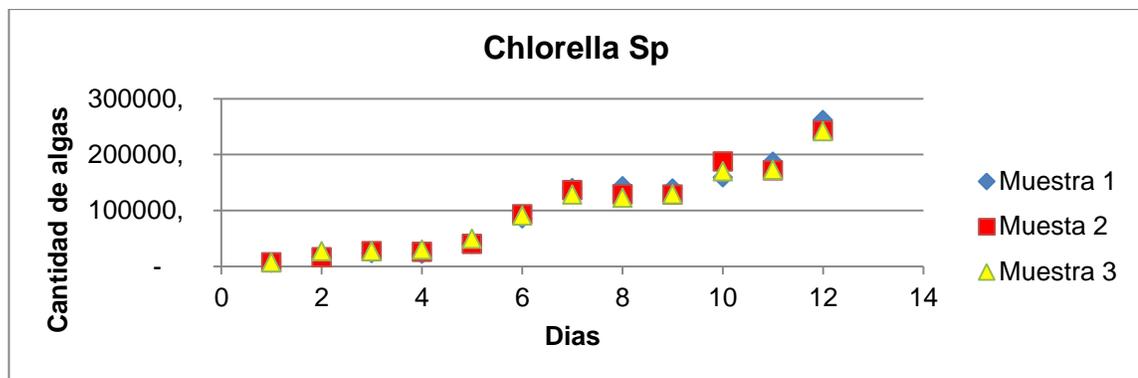
En el caso de las microalgas de la especie *Chlorella Sp.*, se observó un crecimiento desde el segundo día de exposición a un ambiente natural sin

alteración de ningún tipo de parámetro como radiación, temperatura, pH o cualquier otro que haya influido ya sea en su crecimiento o en su declinación de la cantidad de unidades.

Se observó que esta especie de microalgas presenta un crecimiento diferenciado del resto de especies encontradas en las muestras, ya que como se muestra en la siguiente gráfica, esta tiene un crecimiento súbito al día 7 pero de igual forma sigue creciendo hasta el día 12 a un ritmo más lento.

Las gráficas tienen como eje horizontal los días de mediciones y el eje vertical la cantidad de unidades contabilizadas.

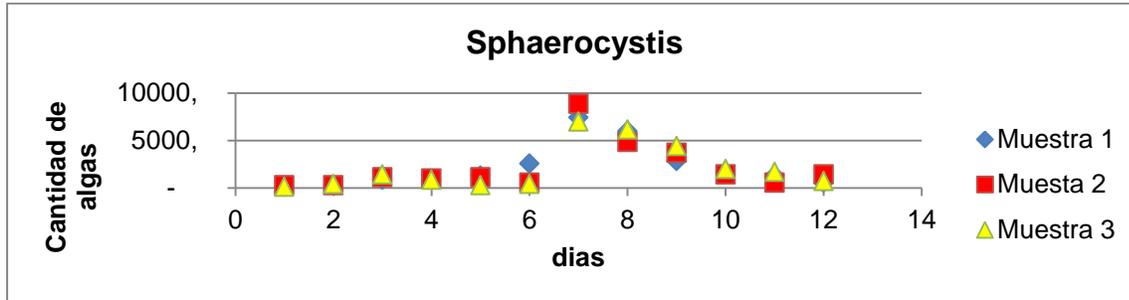
Figura 18. **Crecimiento de Chlorella Sp.**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.

La especie de microalgas Sphaerocystis presenta un máximo crecimiento al séptimo día declinando por completo su crecimiento cada vez más. El estudio presenta análisis de muestras hasta el día 12 y a este día presenta una reducción muy significativa con respecto a la cresta que visiblemente se percibe en la gráfica.

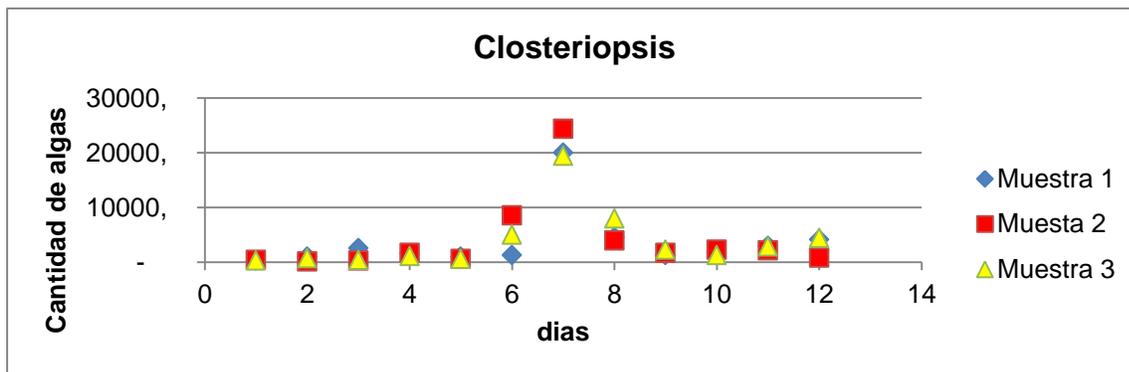
Figura 19. **Crecimiento de Sphaerocystis**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.

En el caso de la especie de Closteriopsis, el comportamiento es bastante similar al de la especie Sphaerocystis, en la que el crecimiento máximo se da al séptimo día y luego de ese período de 7 días inicia el período de decaimiento de unidades, ya que el último día monitoreado, que fue el día 12, es donde se presenta el día con menos cantidad de algas luego del máximo crecimiento.

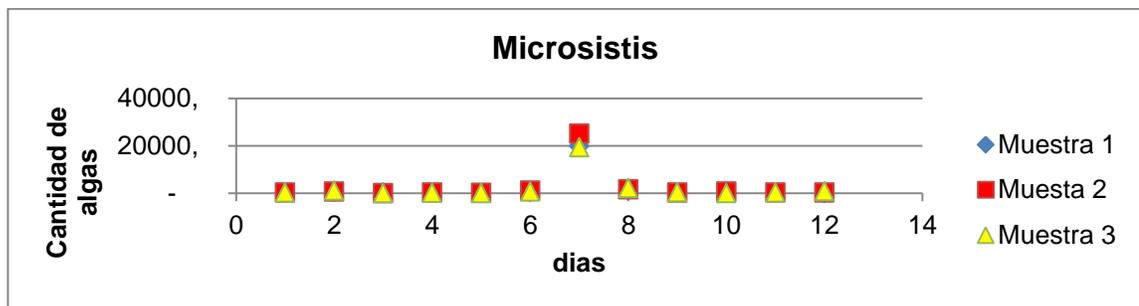
Figura 20. **Crecimiento de Closteriopsis**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.

Por último, se contabilizó la especie *Microsistis*, que presenta el mismo comportamiento de las últimas 2 especies contabilizadas, con un crecimiento máximo al séptimo día y luego un decaimiento hasta el último día de monitoreo, siendo ese último día el número 12.

Figura 21. Crecimiento de *Microsistis*



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.

4.3. Mínimos y máximos de nutrientes

Al momento de realizar el monitoreo de los niveles de nutrientes producidos por la planta se logró visualizar varios puntos.

Los valores de fosfatos presentan un valor muy particular los días lunes a las 11:00, para verificar este dato se realizó una prueba de confirmación dando el mismo resultado bastante alto con respecto a los demás, reflejando que no fue un error de medición. Esto puede conllevar a que dentro de las actividades de la universidad se presentan oficios de descarga al sistema sanitario, de altos contenidos de fosfatos; puede ser el uso de detergentes para lavar sanitarios y otros tipos de áreas que involucre el lavado y desechos con alto contenido de fosfatos u ortofosfatos a la salida del tercer filtro percolador.

Con respecto a los otros valores de nutrientes mostrados en los análisis no se muestra una diferencia tan amplia entre los mínimos y los máximos registrados, incluso realizando pruebas de confirmación de los mismos.

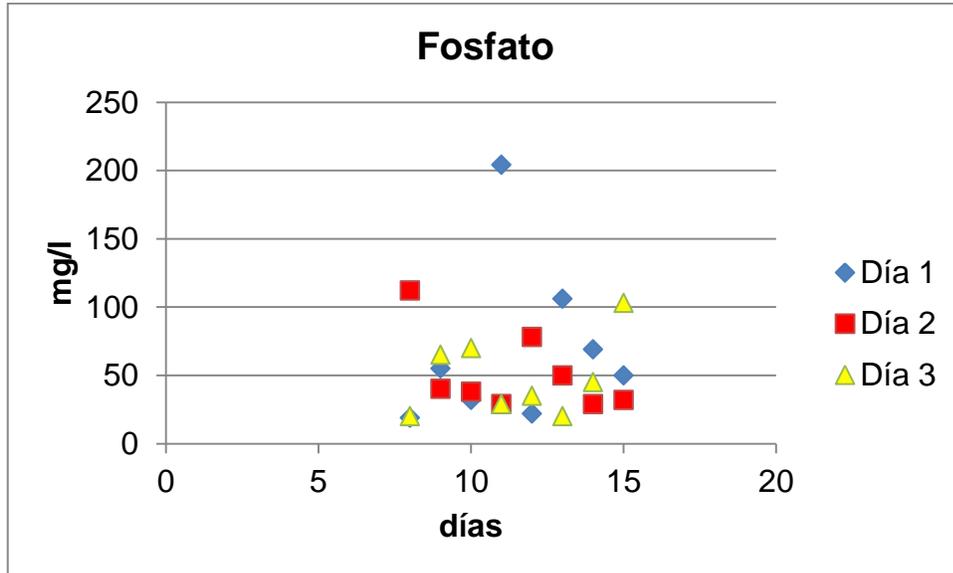
Los valores mínimos para los nutrientes fueron los siguientes:

- Fosfatos = 19 mg/l
- Amonio = 1 mg/l
- Nitrito = 0,1 mg/l
- Nitrato = 76 mg/l

Los valores máximos registrados a la salida del tercer filtro percolador fueron los siguientes

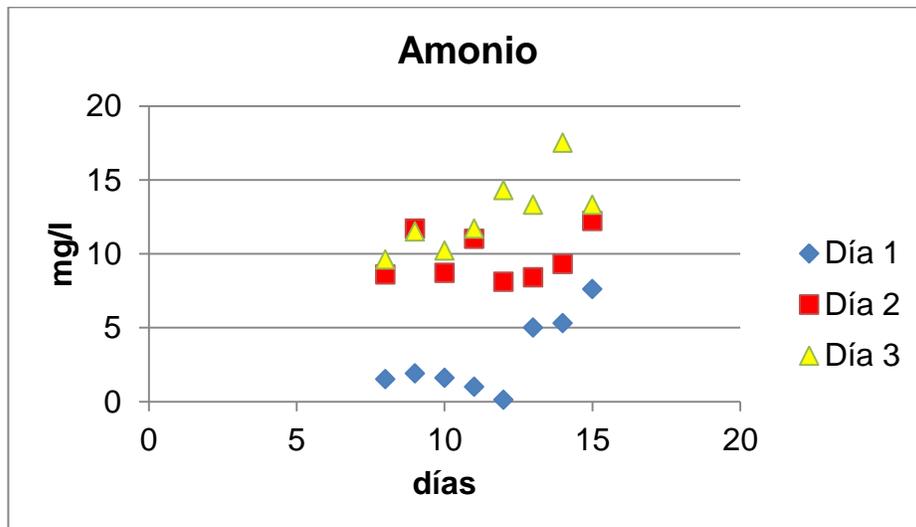
- Fosfatos = 204 mg/l
- Amonio = 17,5 mg/l
- Nitrito = 1,55 mg/l
- Nitrato = 116 mg/l

Figura 22. **Valores registrados de fosfato**



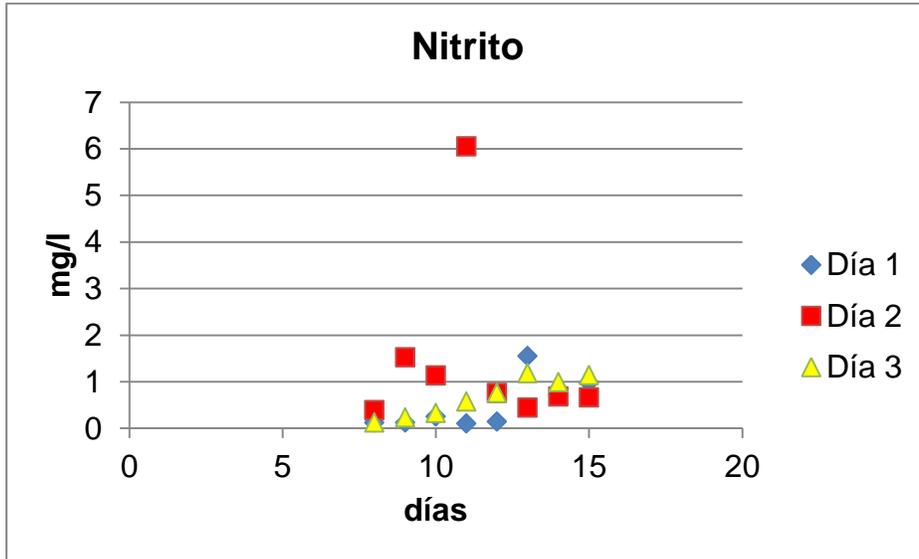
Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.

Figura 23. **Valores registrados de amonio**



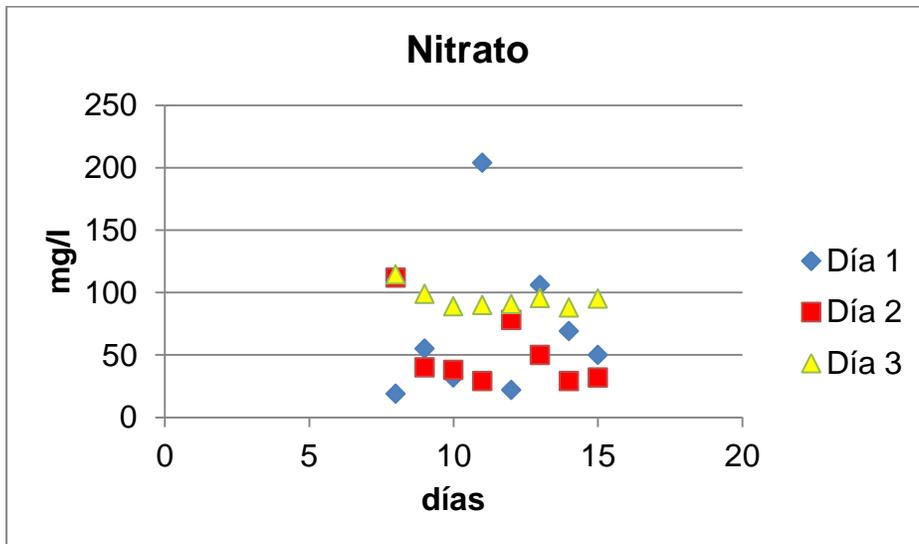
Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.

Figura 24. Valores registrados de nitrito



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.

Figura 25. Valores registrados de nitratos



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.

4.4. Remoción de Nutrientes en muestras

Los resultados se muestran en resúmenes de promedios removidos, es decir no se muestra el total de datos monitoreados en esta sección, si no como un anexo por la cantidad de datos a mostrar, en esa sección se mostrarán resumidos, separados por números de muestras y por cada nutriente en grupos de 3, que fueron el número de muestras monitoreadas.

4.4.1. Remoción de nitrógeno amoniacal

En los resultados finales de remoción de nutrientes se obtuvieron valores bastantes interesantes, por ejemplo en el caso del amonio, este nutriente se elevó al valor máximo de 17,5 mg/l y el mínimo era de 1 mg/l. Pasados los 12 días de exposición al ambiente, en los frascos se notó cierto comportamiento de los valores que en el caso de las muestras que presentaban valores máximos del nutriente estas tenían remociones entre el 24,74 % y el 41,78 %, con base en la medición inicial. Caso contrario se muestra para las muestras que contenían el mínimo de nutrientes, pues estas no reflejan una reducción del nutriente, es más, tienen un valor más alto de lo monitoreado al inicio.

La única explicación a este tipo de comportamiento es la transformación del nitrógeno atmosférico del ambiente a nitrógeno amoniacal presente, en las muestras de agua según el comportamiento del nitrógeno en su ciclo.

4.4.2. Remoción de fosfatos

El comportamiento de las muestras que contenían diferentes límites de fosfatos se mostró diferente, ya que en ambos límites de concentraciones de este nutriente se registraron remociones. En las muestras que tenían el mínimo

de fosfatos las remociones oscilaron entre el 37,69 % y el 40,42 % mientras que las muestras con el máximo registrado mostraban reducciones entre el 23,93 % y el 24,90 %. Valores bastante mayores comparados con las remociones que contenían el mínimo de nitrógeno amoniacal, por ejemplo.

4.4.3. Remoción de nitrato

En el caso de la remoción de nitratos en las 3 muestras de agua, los resultados fueron positivos para ambas concentraciones de mínimos y máximos establecidos por muestras. En el caso de las que presentaban el mínimo de concentraciones de nitritos, el porcentaje de remoción estaba entre el rango de 21,64 % y el 26,60 % y para las muestras que contenían el máximo de contenido, el rango de remoción estaba entre el 46,30 % y el 53,00 %. Ambos resultados muy satisfactorios, especialmente las muestras con el máximo de contenido.

4.4.4. Remoción de nitrito

De forma similar al comportamiento de la remoción de nitrógeno amoniacal es la de la remoción de Nitritos, En estas muestras el comportamiento de remoción fue negativa en el caso de las que contenían el mínimo de este nutriente, es más, la tendencia fue a aumentar. Lo curioso de este caso es que parecía tener una tendencia a estabilizar los valores de nitritos. En el caso de las muestras con las cantidades máximas, sí existió una remoción de nitritos, valores que estaban en un rango entre 43,88 % y 64,52 %.

4.5. Elaboración de modelo matemático

El análisis inicial que se realizó fue un análisis de varianza. Donde se indica con resaltador es que hubo diferencia significativa. Como se trata de un diseño factorial, las variables se analizan en varias etapas: una por una, combinaciones de dos, combinaciones de tres y la combinación final de cuatro.

4.5.1. Análisis univariado de varianza de amonio

Tabla XX. Pruebas de efectos intersujetos de amonio

Variable dependiente: Remoción de amonio (%)

Origen	Tipo III de suma de cuadrados	gl	Cuadrático promedio	F	Sig.
Modelo	95 347,518	16	5 959,220	2,813	,006
ConcAmon	30 756,206	1	30 756,206	14,518	,001
ConcFosf	25 221,627	1	25 221,627	11,906	,002
ConcNitrat	1 871,377	1	1 871,377	,883	,354
ConcNitrit	8 634,699	1	8 634,699	4,076	,052
ConcAmon * ConcFosf	12 850,780	1	12 850,780	6,066	,019
ConcAmon * ConcNitrat	716,339	1	716,339	,338	,565
ConcAmon * ConcNitrit	204,559	1	204,559	,097	,758
ConcFosf * ConcNitrat	3438,652	1	3 438,652	1,623	,212
ConcFosf * ConcNitrit	1785,958	1	1 785,958	,843	,365
ConcNitrat * ConcNitrit	1522,465	1	1 522,465	,719	,403
ConcAmon * ConcFosf * ConcNitrat	21,081	1	21,081	,010	,921
ConcAmon * ConcFosf * ConcNitrit	2,985	1	2,985	,001	,970
ConcAmon * ConcNitrat * ConcNitrit	174,765	1	174,765	,082	,776
ConcFosf * ConcNitrat * ConcNitrit	2,906	1	2,906	,001	,971
ConcAmon * ConcFosf * ConcNitrat * ConcNitrit	3 866,610	1	3 866,610	1,825	,186
Error	67 790,174	32	2 118,443		
Total	163 137,692	48			

Fuente: elaboración propia, empleando programa SPSS.

Se puede observar que existe significatividad en cuanto a la remoción de amonio cuando las concentraciones de amonio y fósforo se encuentran en su

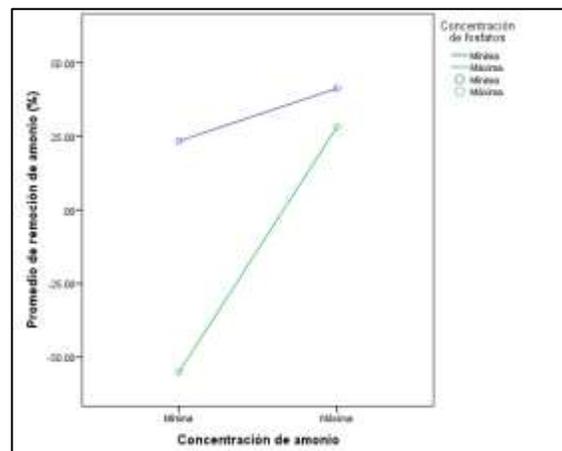
máxima y mínima concentración, ya que estos tienen su valor significativo $<0,05$ en los efectos que sufren en el % de remoción de amonio.

Tabla XXI. **Resumen de análisis de remoción de amonio con concentración amonio y concentración de fosfatos**

Remoción de amonio (%)		Resúmenes de casos		
Concentraciones de amonio	Concentraciones de fosfatos	N	Media	Desviación estándar
Mínima	Mínima	12	23,4108	60,25057
	Máxima	12	-55,1592	46,32095
	Total	24	-15,8742	66,12664
Máxima	Mínima	12	41,3125	17,48800
	Máxima	12	28,1917	45,86052
	Total	24	34,7521	34,59840
Total	Mínima	24	32,3617	44,33979
	Máxima	24	-13,4838	62,00321
	Total	48	9,4390	58,13798

Fuente: elaboración propia, empleando programa SPSS.

Figura 26. **Porcentaje de remoción amonio vs concentraciones de fosfato y amonio**



Fuente: elaboración propia, programa SPSS.

4.5.2. Análisis univariado de varianza de fosfato

A continuación se presentara el análisis univariado de varianza de fosfato.

Tabla XXII. Pruebas de efectos intersujetos de fosfatos

Pruebas de efectos inter-sujetos

Variable dependiente: Remoción de fosfatos (%)

Origen	Tipo III de suma de cuadrados	gl	Cuadrático promedio	F	Sig.
Modelo	119 622,034	16	7476.377	85.508	.000
ConcAmon	7 881,481	1	7881.481	90.141	.000
ConcFosf	2 467,197	1	2467.197	28.217	.000
ConcNitrat	18 164,355	1	18164.355	207.747	.000
ConcNitrit	3 687,786	1	3687.786	42.177	.000
ConcAmon * ConcFosf	3 573,338	1	3573.338	40.868	.000
ConcAmon * ConcNitrat	2 447,449	1	2447.449	27.992	.000
ConcAmon * ConcNitrit	5 056,334	1	5056.334	57.830	.000
ConcFosf * ConcNitrat	4 674,235	1	4674.235	53.460	.000
ConcFosf * ConcNitrit	498,263	1	498.263	5.699	.023
ConcNitrat * ConcNitrit	4 060,696	1	4060.696	46.442	.000
ConcAmon * ConcFosf * ConcNitrat	4 895,470	1	4895.470	55.990	.000
ConcAmon * ConcFosf * ConcNitrit	6 791,807	1	6791.807	77.678	.000
ConcAmon * ConcNitrat * ConcNitrit	3 544,063	1	3544.063	40.534	.000
ConcFosf * ConcNitrat * ConcNitrit	1 483,964	1	1483.964	16.972	.000
ConcAmon * ConcFosf * ConcNitrat * ConcNitrit	3 018,634	1	3018.634	34.524	.000
Error	2 797,921	32	87.435		
Total	122 419,955	48			

Fuente: elaboración propia, programa SPSS.

Se puede observar que existe significatividad en cuanto a la remoción de fosfato con todos los otros nutrientes y combinaciones cuando se encuentran en

su máxima y mínima concentración, ya que estos tienen su valor significativo <0,05 en los efectos que sufren en el % de remoción de amonio.

Tabla XXIII. Resumen de análisis de remoción de fosfatos con concentración de nitritos, amonio, nitratos y concentración de fosfato

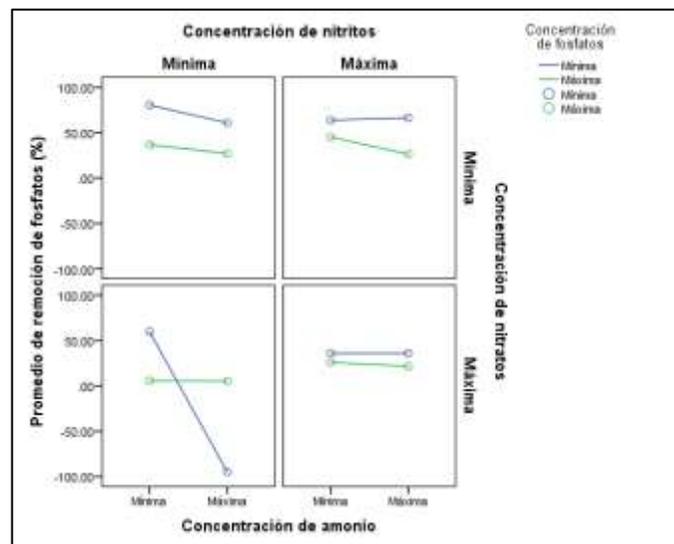
Resúmenes de casos						
Remoción de fosfatos (%)						
Concentraciones de amonio	Concentraciones de fosfatos	Concentraciones de nitratos	Concentraciones de nitritos	N	Media	Desviación estándar
Mínima	Mínima	Mínima	Mínima	3	80.5167	6.44900
			Máxima	3	63.7033	.82561
			Total	6	72.1100	10.08538
		Máxima	Mínima	3	59.8833	9.93042
			Máxima	3	36.0100	13.23287
			Total	6	47.9467	16.74723
	Total	Mínima	6	70.2000	13.55734	
		Máxima	6	49.8567	17.33183	
		Total	12	60.0283	18.24710	
	Máxima	Mínima	Mínima	3	36.7767	2.01495
			Máxima	3	45.1767	10.52510
			Total	6	40.9767	8.19165
		Máxima	Mínima	3	5.7400	.00000
			Máxima	3	26.0400	3.13501
			Total	6	15.8900	11.29417
	Total	Mínima	6	21.2583	17.04718	
		Máxima	6	35.6083	12.57402	
		Total	12	28.4333	16.12826	
Total	Mínima	Mínima	6	58.6467	24.33549	
		Máxima	6	54.4400	12.14722	
		Total	12	56.5433	18.46851	
	Máxima	Mínima	6	32.8117	30.31329	
		Máxima	6	31.0250	10.18799	
		Total	12	31.9183	21.58078	
Total	Mínima	12	45.7292	29.47711		
	Máxima	12	42.7325	16.24118		
	Total	24	44.2308	23.32503		
Máxima	Mínima	Mínima	Mínima	3	60.8400	3.30822
			Máxima	3	66.5700	3.30822
			Total	6	63.7050	4.31339
		Máxima	Mínima	3	-94.8433	19.85508
			Máxima	3	36.0100	23.15752
			Total	6	-29.4167	74.22248
Total	Mínima	6	-17.0017	86.21634		
	Máxima	6	51.2900	22.33965		

Continuación de la tabla XXIII.

		Total	12	17,1442	69,83932
Máxima	Mínima	Mínima	3	27,0767	1,34523
		Máxima	3	26,3000	,00000
		Total	6	26,6883	,95122
	Máxima	Mínima	3	5,2233	,21939
		Máxima	3	21,6467	2,01495
		Total	6	13,4350	9,08631
Total	Mínima	6	16,1500	12,00056	
	Máxima	6	23,9733	2,84957	
	Total	12	20,0617	9,26519	
Total	Mínima	Mínima	6	43,9583	18,63036
		Máxima	6	46,4350	22,15580
		Total	12	45,1967	19,55935
	Máxima	Mínima	6	-44,8100	56,22909
		Máxima	6	28,8283	16,67405
		Total	12	-7,9908	55,15802
	Total	Mínima	12	-4,4258	61,18783
		Máxima	12	37,6317	20,83376
		Total	24	18,6029	48,74432

Fuente: elaboración propia, empleando programa SPSS.

Figura 27. **Porcentaje de remoción fosfato vs concentraciones de nitritos, amonio, fosfato y nitratos**



Fuente: elaboración propia, programa SPSS.

4.5.3. Análisis univariado de varianza de Nitrato

A continuación se presentara las pruebas de efectos intersujetos de nitratos.

Tabla XXIV. Pruebas de efectos intersujetos de nitratos

Variable dependiente: Remoción de nitratos (%)

Origen	Tipo III de suma de cuadrados	gl	Cuadrático promedio	F	Sig.
Modelo	97 701,443	16	6 106,340	17,883	,000
ConcAmon	867,935	1	867,935	2,542	,121
ConcFosf	2 021,895	1	2 021,895	5,921	,021
ConcNitrat	7 991,034	1	7 991,034	23,402	,000
ConcNitrit	263,813	1	263,813	,773	,386
ConcAmon * ConcFosf	140,733	1	140,733	,412	,525
ConcAmon * ConcNitrat	1 824,224	1	1 824,224	5,342	,027
ConcAmon * ConcNitrit	1 707,302	1	1 707,302	5000	,032
ConcFosf * ConcNitrat	870,148	1	870,148	2,548	,120
ConcFosf * ConcNitrit	1 926,474	1	1 926,474	5642	,024
ConcNitrat * ConcNitrit	13,262	1	13,262	,039	,845
ConcAmon * ConcFosf * ConcNitrat	9,144	1	9,144	,027	,871
ConcAmon * ConcFosf * ConcNitrit	3 393,435	1	3 393,435	9,938	,004
ConcAmon * ConcNitrat * ConcNitrit	1 255,323	1	1 255,323	3,676	,064
ConcFosf * ConcNitrat * ConcNitrit	841,269	1	841,269	2,464	,126
ConcAmon * ConcFosf * ConcNitrat * ConcNitrit	6 456,792	1	6 456,792	18,909	,000
Error	10 926,921	32	341,466		
Total	108 628,364	48			

Fuente: elaboración propia, empleando programa SPSS.

Se puede observar que existe significatividad en cuanto a la remoción de nitratos cuando las concentraciones de nitrato y fósforo se encuentran en su máxima y mínima concentración, y combinaciones de nitrito con amonio, nitrato con amonio, fosfato con nitrito, amonio con fosfato y nitrito, ya que estos tienen su valor significativo <0.05 en los efectos que sufren en el % de remoción de amonio.

Tabla XXV. **Resumen de análisis de remoción de nitrato con concentración fosfato, amonio, nitritos y concentración de nitratos**

Resúmenes de casos

Remoción de nitratos (%)

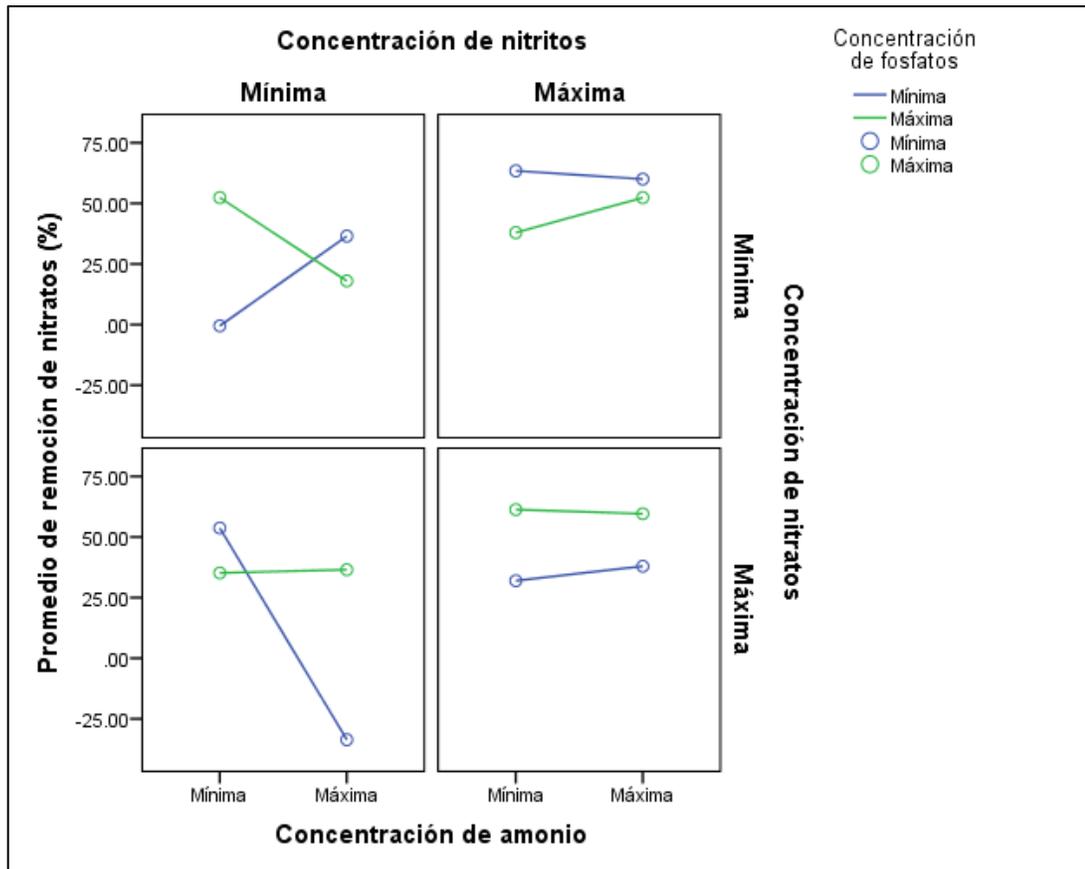
Concentraciones de amonio	Concentraciones de fosfatos	Concentraciones de nitritos	Concentraciones de nitratos	N	Media	Desviación estándar	
Mínima	Mínima	Mínima	Mínima	3	-,5300	33,74937	
			Máxima	3	63,4367	12,58460	
			Total	6	31,4533	41,79087	
		Máxima	Mínima	3	53,7033	21,85507	
			Máxima	3	31,9733	7,79474	
			Total	6	42,8383	18,89494	
	Total	Mínima	6	26,5867	39,10296		
		Máxima	6	47,7050	19,61210		
			Total	12	37,1458	31,48785	
		Máxima	Mínima	Mínima	3	52,3833	11,90500
				Máxima	3	37,9267	34,44793
				Total	6	45,1550	24,37322
Máxima			Mínima	3	35,1867	6,06428	
			Máxima	3	61,3100	5,15780	
			Total	6	48,2483	15,16838	
Total		Mínima	6	43,7850	12,65383		
		Máxima	6	49,6183	25,48213		
			Total	12	46,7017	19,42205	
		Total	Mínima	Mínima	6	25,9267	36,77289
				Máxima	6	50,6817	27,07842
				Total	12	38,3042	33,39279
	Máxima		Mínima	6	44,4450	17,56781	
			Máxima	6	46,6417	17,12123	
			Total	12	45,5433	16,57846	
	Total	Mínima	12	35,1858	29,12848		
		Máxima	12	48,6617	21,70222		
			Total	24	41,9238	26,04644	
	Máxima	Mínima	Mínima	Mínima	3	36,5067	39,08474
				Máxima	3	60,0300	1,47224
				Total	6	48,2683	27,89118
Máxima			Mínima	3	-33,5967	8,26421	
			Máxima	3	37,9267	8,20281	
			Total	6	2,1650	39,86113	
Total		Mínima	6	1,4550	45,96421		
		Máxima	6	48,9783	13,20411		
			Total	12	25,2167	40,68805	
		Máxima	Mínima	Mínima	3	17,9900	2,28631
				Máxima	3	52,3833	15,58621
				Total	6	35,1867	21,31040
	Máxima	Mínima	Mínima	3	36,5067	14,30849	
			Máxima	3	59,6067	10,84630	
			Total	6	48,0567	17,00097	

Continuación de la tabla XXV.

	Total		Mínima	6	27,2483	13,66909
			Máxima	6	55,9950	12,64444
			Total	12	41,6217	19,56979
	Total	Mínima	Mínima	6	27,2483	26,75813
			Máxima	6	56,2067	10,75084
			Total	12	41,7275	24,63118
		Máxima	Mínima	6	1,4550	39,79391
			Máxima	6	48,7667	14,66213
			Total	12	25,1108	37,78870
		Total	Mínima	12	14,3517	35,02422
			Máxima	12	52,4867	12,85886
			Total	24	33,4192	32,32859
Total	Mínima	Mínima	Mínima	6	17,9883	38,44696
			Máxima	6	61,7333	8,22784
			Total	12	39,8608	34,99377
		Máxima	Mínima	6	10,0533	50,04761
			Máxima	6	34,9500	7,86449
			Total	12	22,5017	36,54711
		Total	Mínima	12	14,0208	42,75039
			Máxima	12	48,3417	15,95385
			Total	24	31,1813	36,09821
	Máxima	Mínima	Mínima	6	35,1867	20,33846
			Máxima	6	45,1550	25,18997
			Total	12	40,1708	22,43990
		Máxima	Mínima	6	35,8467	9,85526
			Máxima	6	60,4583	7,65300
			Total	12	48,1525	15,36133
		Total	Mínima	12	35,5167	15,24110
			Máxima	12	52,8067	19,46580
			Total	24	44,1617	19,24324
	Total	Mínima	Mínima	12	26,5875	30,66899
			Máxima	12	53,4442	19,85329
			Total	24	40,0158	28,74916
		Máxima	Mínima	12	22,9500	36,93401
			Máxima	12	47,7042	15,23787
			Total	24	35,3271	30,38597
		Total	Mínima	24	24,7688	33,25212
			Máxima	24	50,5742	17,55425
			Total	48	37,6715	29,35828

Fuente: elaboración propia, empleando programa SPSS.

Figura 28. **Porcentaje de remoción nitratos vs concentraciones de nitritos, amonio nitratos y fosfato**



Fuente: elaboración propia, empleando programa SPSS.

4.5.4. Análisis univariado de varianza de nitrito

A continuación se describe el análisis univariado de varianza de nitrito.

Tabla XXVI. Pruebas de efectos inter-sujetos nitrito

Variable dependiente: Remoción de nitritos (%)

Origen	Tipo III de suma de cuadrados	gl	Cuadrático promedio	F	Sig.
Modelo	123 295 845,787	16	7 705 990,362	103,512	,000
ConcAmon	16 912 696,870	1	16 912 696,870	227,183	,000
ConcFosf	1 926 994,358	1	1 926 994,358	25,885	,000
ConcNitrat	3 061 749,522	1	3 061 749,522	41,128	,000
ConcNitrit	32 533 045,332	1	32 533 045,332	437, 007	,000
ConcAmon * ConcFosf	1 249 988,158	1	1 249 988,158	16,791	,000
ConcAmon * ConcNitrat	4 584 083,034	1	4 584 083,034	61,577	,000
ConcAmon * ConcNitrit	15 764 662,876	1	15 764 662,876	211,762	,000
ConcFosf * ConcNitrat	1 367 121,386	1	1 367 121,386	18,364	,000
ConcFosf * ConcNitrit	1 869 508,391	1	1 869 508,391	25,113	,000
ConcNitrat * ConcNitrit	3 029 818,730	1	3 029 818,730	40,699	,000
ConcAmon * ConcFosf * ConcNitrat	2 779 252,438	1	2 779 252,438	37,333	,000
ConcAmon * ConcFosf * ConcNitrit	1 180 086,209	1	1 180 086,209	15,852	,000
ConcAmon * ConcNitrat * ConcNitrit	4 235 142,853	1	4 235 142,853	56,889	,000
ConcFosf * ConcNitrat * ConcNitrit	1 485 493,109	1	1 485 493,109	19,954	,000
ConcAmon * ConcFosf * ConcNitrat * ConcNitrit	2 862 654,041	1	2 862 654,041	38,453	,000
Error	2 382 243,625	32	74 445,113		
Total	125 678 089,413	48			

Fuente: elaboración propia, empleando programa SPSS.

Se puede observar que existe significatividad en cuanto a la remoción de nitritos cuando se dan las concentraciones de todos los nutrientes que se encuentran en su máxima y mínima concentración y combinaciones, ya que

estos tienen su valor significativo $<0,05$ en los efectos que sufren en el % de remoción de amonio.

Tabla XXVII. **Resumen de análisis de remoción de nitrito con concentración de nitratos, fosfatos, amonio y concentración de nitritos**

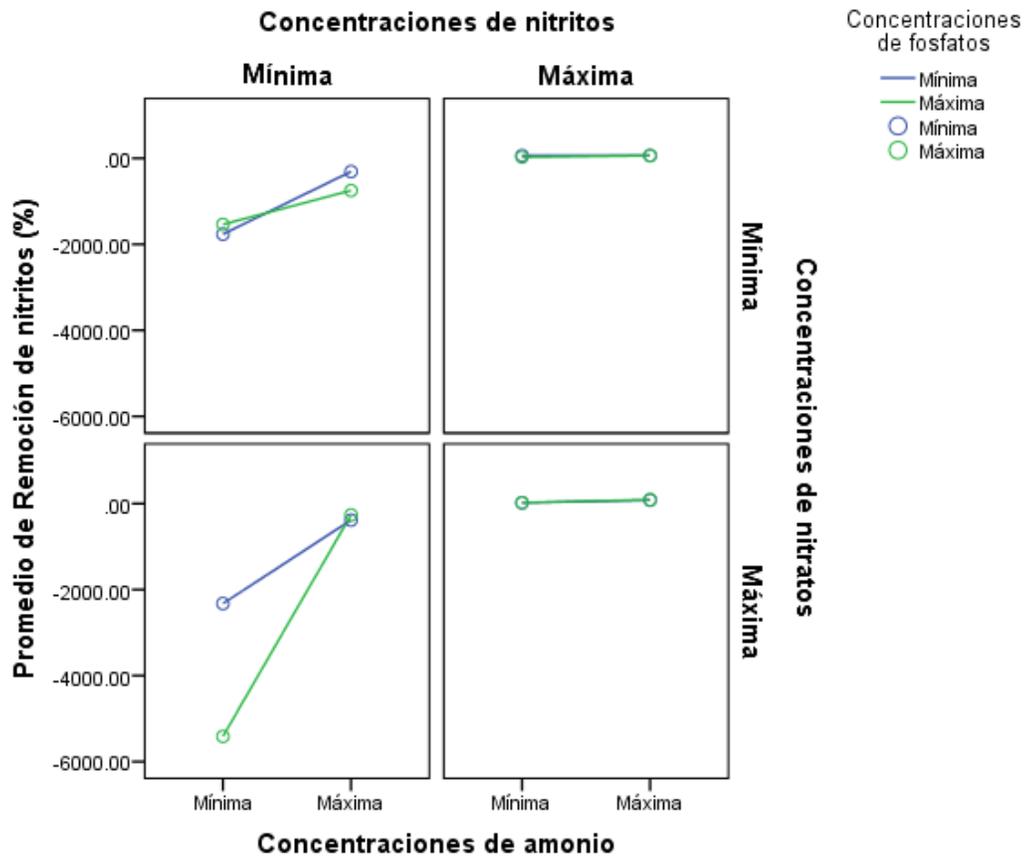
Resúmenes de casos						
Remoción de nitritos (%)						
Concentraciones de fosfatos	Concentraciones de nitratos	Concentraciones de nitritos	Concentraciones de amonio	N	Media	Desviación estándar
Mínima	Mínima	Mínima	Mínima	3	-1763,6333	253,08004
			Máxima	3	-309,0900	181,82000
			Total	6	-1036,3617	820,70220
		Máxima	Mínima	3	64,4867	27,77632
			Máxima	3	65,1767	22,65144
			Total	6	64,8317	22,67129
	Total	Mínima	6	-849,5733	1014,16726	
		Máxima	6	-121,9567	235,48100	
		Total	12	-485,7650	798,19175	
	Máxima	Mínima	Mínima	3	-2 324,3333	262,35088
			Máxima	3	-384,8467	344,17398
			Total	6	-1 354,5900	1096,99410
		Máxima	Mínima	3	16,3800	17,63192
			Máxima	3	79,3833	13,74500
			Total	6	47,8817	37,29276
	Total	Mínima	6	-1 153,9767	1 292,80208	
		Máxima	6	-152,7317	334,82937	
		Total	12	-653,3542	1041,18439	
Total	Mínima	Mínima	6	-2043,9833	384,01347	
		Máxima	6	-346,9683	249,65460	
		Total	12	-1195,4758	938,49728	
		Máxima	Mínima	6	40,4333	33,57438
			Máxima	6	72,2800	18,47576
			Total	12	56,3567	30,72694
	Total	Mínima	12	-1001,7750	1119,14523	
		Máxima	12	-137,3442	276,44683	
		Total	24	-569,5596	911,31634	
	Máxima	Mínima	Mínima	3	-1536,3633	240,51958
			Máxima	3	-748,4867	547,97421
			Total	6	-1142,4250	573,99917
Máxima			Mínima	3	27,8333	12,38784
			Máxima	3	61,1667	12,08865
			Total	6	44,5000	21,28781
Total		Mínima	6	-754,2650	870,18079	
		Máxima	6	-343,6600	562,87681	
		Total	12	-548,9625	730,87830	
Máxima		Mínima	Mínima	3	-5415,1500	662,35204
			Máxima	3	-263,6367	327,77512
			Total	6	-2839,3933	2860,04993
	Máxima	Mínima	3	22,6800	16,39046	
		Máxima	3	89,6567	10,26004	
		Total	6	56,1683	38,66948	

Continuación de la tabla XXVII.

	Total	Mínima	6	-2696,2350	3007,75499
		Máxima	6	-86,9900	283,65749
		Total	12	-1391,6125	2450,59801
Total	Mínima	Mínima	6	-3475,7567	2170,74175
		Máxima	6	-506,0617	483,33090
		Total	12	-1990,9092	2157,14263
	Máxima	Mínima	6	25,2567	13,29697
		Máxima	6	75,4117	18,54900
		Total	12	50,3342	30,37784
	Total	Mínima	12	-1725,2500	2341,96433
		Máxima	12	-215,3250	445,59438
		Total	24	-970,2875	1820,13025
Total	Mínima	Mínima	6	-1649,9983	253,48603
		Máxima	6	-528,7883	437,32657
		Total	12	-1089,3933	677,48761
	Máxima	Mínima	6	46,1600	27,80347
		Máxima	6	63,1717	16,38637
		Total	12	54,6658	23,50227
	Total	Mínima	12	-801,9192	902,32025
		Máxima	12	-232,8083	427,34541
		Total	24	-517,3638	749,14990
	Máxima	Mínima	6	-3869,7417	1751,84462
		Máxima	6	-324,2417	307,83837
		Total	12	-2096,9917	2205,99042
	Máxima	Mínima	6	19,5300	15,61153
		Máxima	6	84,5200	12,22047
		Total	12	52,0250	36,47714
	Total	Mínima	12	-1925,1058	2349,57092
		Máxima	12	-119,8608	297,84488
		Total	24	-1022,4833	1879,57677
Total	Mínima	Mínima	12	-2759,8700	1663,72679
		Máxima	12	-426,5150	376,05766
		Total	24	-1593,1925	1676,83373
	Máxima	Mínima	12	32,8450	25,60404
		Máxima	12	73,8458	17,72651
		Total	24	53,3454	30,03922
	Total	Mínima	24	-1363,5125	1832,68167
		Máxima	24	-176,3346	364,82487
		Total	48	-769,9235	1438,26536

Fuente: elaboración propia, empleando programa SPSS.

Figura 29. **Porcentaje de remoción nitritos vs concentraciones de nitratos, fosfatos, amonio y nitritos**



Fuente: elaboración propia, programa SPSS.

4.5.5. Análisis de modelos

Se verificaron diferentes métodos para poder relacionar las variables dependientes e independientes. Para ello se realizó un análisis multivariable correlacional y un análisis correlacional canónico, para lo cual se observó que el modelo que más se ajusta para determinar datos correlacionales es correlacional canónico, debido a que las variables de fósforo y amonio sí tienen

relación entre ellas, por lo que estas sí se ven involucradas con las otras concentraciones para determinar el porcentaje de remoción de nutrientes en general que se busca obtener a partir de los datos analizados.

Para realizar el análisis canónico, el cual es una continuación de un análisis multivariable correlacional en donde se tienen más de una variable dependiente, fue necesaria la utilización de un software

Tabla XXVIII. Datos estadísticos descriptivos

Variable	Observaciones con datos	per	sin datos perc	Mínimo	Máximo	Media	Desv. típica
Amonio	48	0	48	1.000	17.500	9.250	8.337
Fosfatos	48	0	48	19.000	204.000	111.500	93.479
% remoción amonio	48	0	48	-138.095	90.476	9.439	58.138
% remoción fosfatos	48	0	48	-117.765	84.241	31.417	39.958
% remoción nitratos	48	0	48	-42.857	80.159	37.671	29.358
% remoción nitritos	48	0	48	-6172.727	99.897	-769.923	1438.266

Fuente: elaboración propia, empleando programa XLStat.

Tabla XXIX. Matriz de correlaciones

Variables	Amonio	Fosfatos	emoción amo	emoción fosfa	emoción nitra	emoción nitrit
Amonio	1	0.000	0.440	-0.324	-0.146	0.417
Fosfatos	0.000	1	-0.398	-0.181	0.223	-0.141
% remoción amonio	0.440	-0.398	1	-0.084	-0.232	0.086
% remoción fosfatos	-0.324	-0.181	-0.084	1	-0.363	0.037
% remoción nitratos	-0.146	0.223	-0.232	-0.363	1	-0.026
% remoción nitritos	0.417	-0.141	0.086	0.037	-0.026	1

Fuente: elaboración propia, empleando programa XLStat.

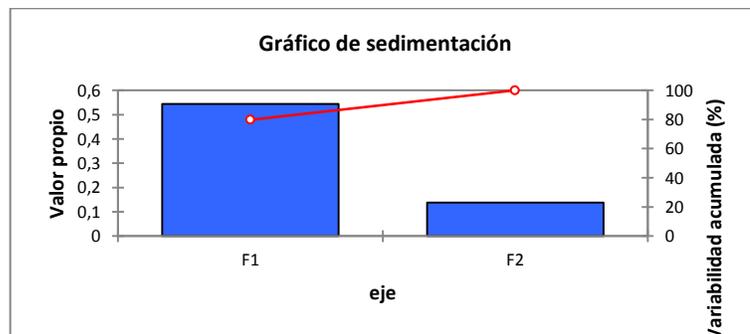
Tabla XXX. **Valores propios**

	F1	F2
Valor propio	0.544	0.138
Variabilidad (%)	79.784	20.216
% acumulado	79.784	100.000

Fuente: elaboración propia.

Donde se tienen dos correlaciones de F1 y F2. Sin embargo, la mayor variabilidad se tiene en el F1, por lo que solo se deben sacar correlaciones de F1 para determinar el modelo que nos de la representación de esa variabilidad.

Figura 30. **Variabilidad entre las correlaciones F1 Y F2**



Fuente: elaboración propia, programa XLStat.

Figura 31. **Coefficientes canónicos estandarizados**

Coefficientes canónicos estandarizados (Y1):		
	F1	F2
Amonio (x1)	-0,896	0,444
Fosfatos (x2)	0,444	0,896
Coefficientes canónicos estandarizados (Y2):		
	F1	F2
% remoción amonio (y1)	-0,634	-0,553
% remoción fosfatos (y2)	0,353	-0,913
% remoción nitratos (y3)	0,279	-0,089
% remoción nitritos (y4)	-0,543	0,238

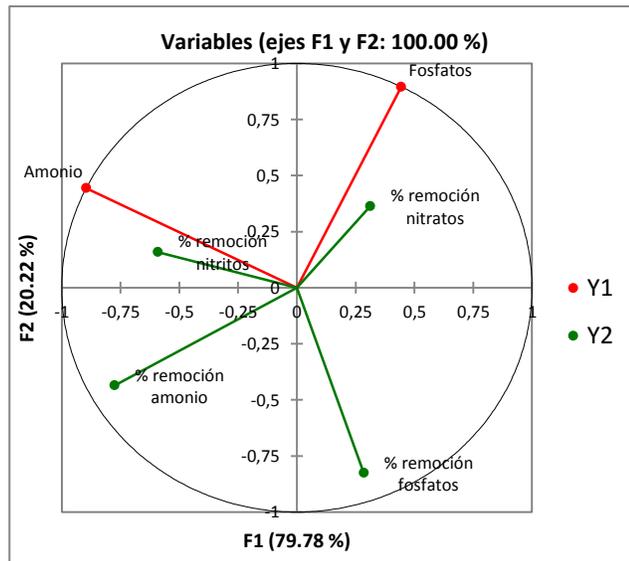
Fuente: elaboración propia.

Figura 32. **Coefficientes canónicos no estandarizados**

Coefficientes canónicos no estandarizados (Y1):		
	F1	F2
Amonio (x1)	-0,107	0,053
Fosfatos (x2)	0,005	0,010
Coefficientes canónicos no estandarizados (Y2):		
	F1	F2
% remoción amonio (y1)	-0,011	-0,010
% remoción fosfatos (y2)	9,602	-0,023
% remoción nitratos (y3)	0,010	-0,003
% remoción nitritos (y4)	-0,0004	0,0002

Fuente: elaboración propia.

Figura 33. **Representación de las correlaciones F1 y F2 con las variables**



Fuente: elaboración propia, empleando programa XLStat.

4.5.6. Ecuaciones del Modelo Correlacional

A continuación se presentan las ecuaciones del modelo correlacional.

Tabla III. **Ecuaciones del modelo correlacional**

	Combinación lineal de las x			
	Primera correlación canónica			
	$V1 = -0,107A_{monio} + 0,005F_{osfatos}$			
Equivale a:	$V1 = -0,107x_1 + 0,005x_2$			
	Combinación lineal de las y			
	Primera correlación canónica			
	$U1 = -0,011 \%remA_{monio} + 9,602 \%remF_{osfatos} + 0,01 \%remN_{itratos} - 0,0004 \%remN_{itritos}$			
Equivale a:	$U1 = -0,011y_1 + 9,602y_2 + 0,01y_3 - 0,0004y_4$			

Fuente: elaboración propia.

4.5.7. **Ecuaciones del modelo predictivo para remoción de nutrientes**

Para realizar el modelo predictivo y determinar los diferentes porcentajes de remoción de nutrientes, se utilizó el método de regresión por mínimos cuadrados parciales, en donde se analizaron las variables que más influyen para tener una mayor cantidad de remoción y todas las variables en conjunto. Se determinaron 4 ecuaciones que ayudan a predecir el porcentaje removido de cada una de las variables estudiadas, como lo son nitritos, nitratos, fosfato y amonio, en función de todas ellas. Para esto fue necesario utilizar el programa de XLStats.

Tabla XXXI. **Parámetros del modelo**

Variable	% remoción amonio	% remoción fosfatos	% remoción nitratos	% remoción nitritos
Intercepción	-0,976	142,870	-19,622	-874,128
Amonio	3,236	-1,385	-0,348	73,430
Fosfatos	-0,224	-0,054	0,094	-1,958
Nitratos	0,229	-1,056	0,562	-13,360
Nitritos	-20,007	10,582	-4,738	1 122,278

Fuente: elaboración propia.

4.5.8. Ecuaciones del modelo predictivo

A continuación se presentan las ecuaciones del modelo predictivo.

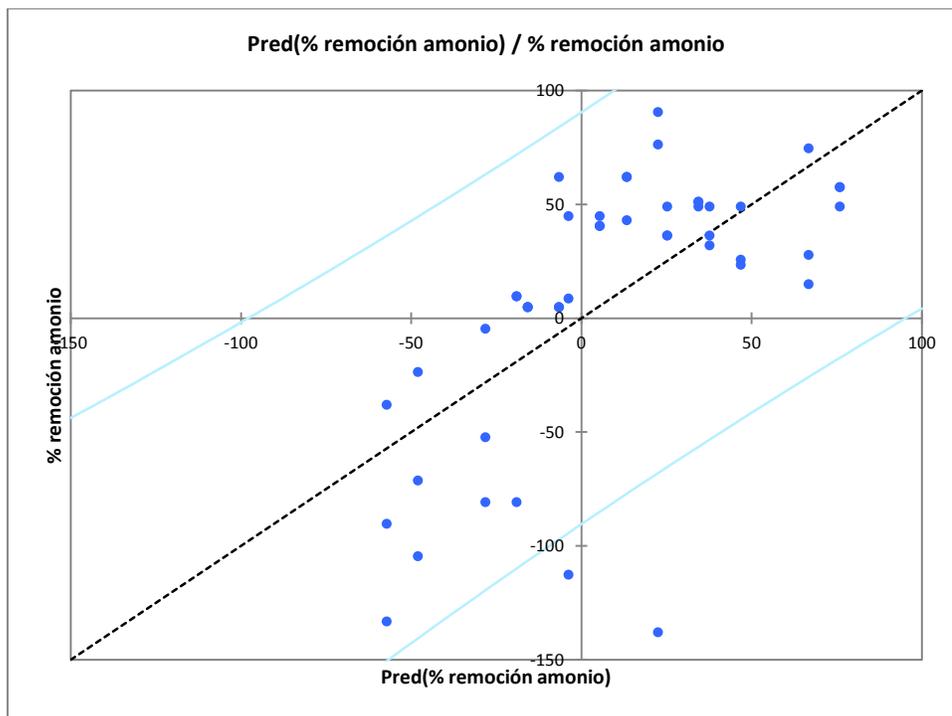
- % remoción amonio = $-0,97610385297762 + 3,23638430215705 \cdot \text{amonio} - 0,224205608221564 \cdot \text{fosfatos} + 0,228997815081206 \cdot \text{nitratos} - 20,00719670879 \cdot \text{nitritos}$
- % remoción fosfatos = $142,869537738514 - 1,38498241235932 \cdot \text{amonio} - 5,38963973392522 \cdot 10^{-2} \cdot \text{fosfatos} - 1,05585539721351 \cdot \text{nitratos} + 10,5815161413411 \cdot \text{nitritos}$
- % remoción nitratos = $-19,6221544068836 - 0,347599135679979 \cdot \text{amonio} + 9,37059324778441 \cdot 10^{-2} \cdot \text{fosfatos} + 0,56217683123565 \cdot \text{nitratos} - 4,73756582157699 \cdot \text{nitritos}$
- % remoción nitritos = $-874,128445012166 + 73,4299427994858 \cdot \text{amonio} - 1,95839175350234 \cdot \text{fosfatos} - 13,3597977447721 \cdot \text{nitratos} + 1122,27788749952 \cdot \text{nitritos}$

Tabla XXXII. **Estadísticos de bondad de ajuste para % de remoción de amonio**

GL	44,000
R ²	0,415
Desv. típica	45,947
MEC	1935,173
RMSE	43,991

Fuente: elaboración propia.

Figura 34. **Gráfico de puntos para realizar modelo de % deremoción amonio**



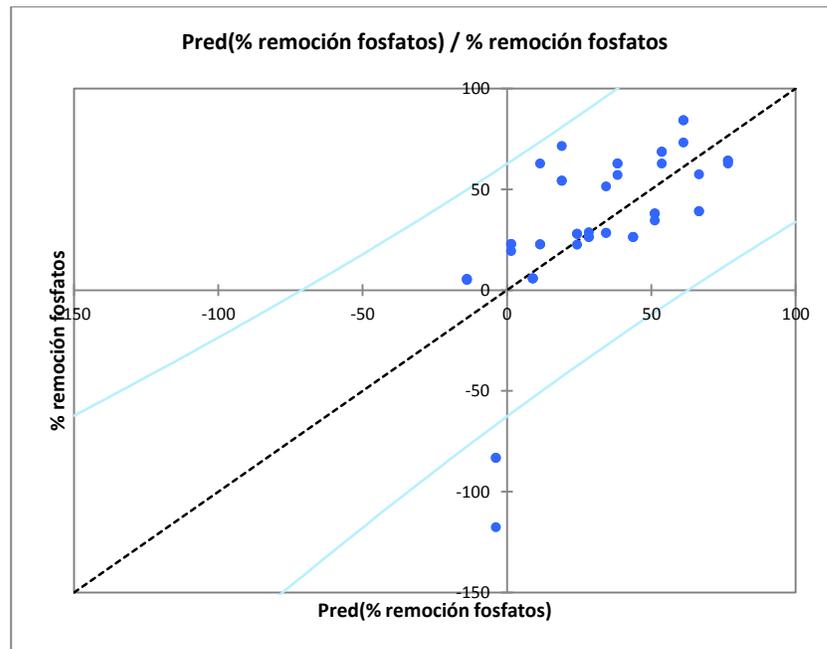
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXIII. **Estadísticos de bondad de ajuste para % de remoción de fosfato**

GL	44 000
R ²	0 422
Desv. típica	31 390
MEC	903 198
RMSE	30 053

Fuente: elaboración propia.

Figura 35. **Gráfico de puntos para realizar modelo de % de remoción fosfato**



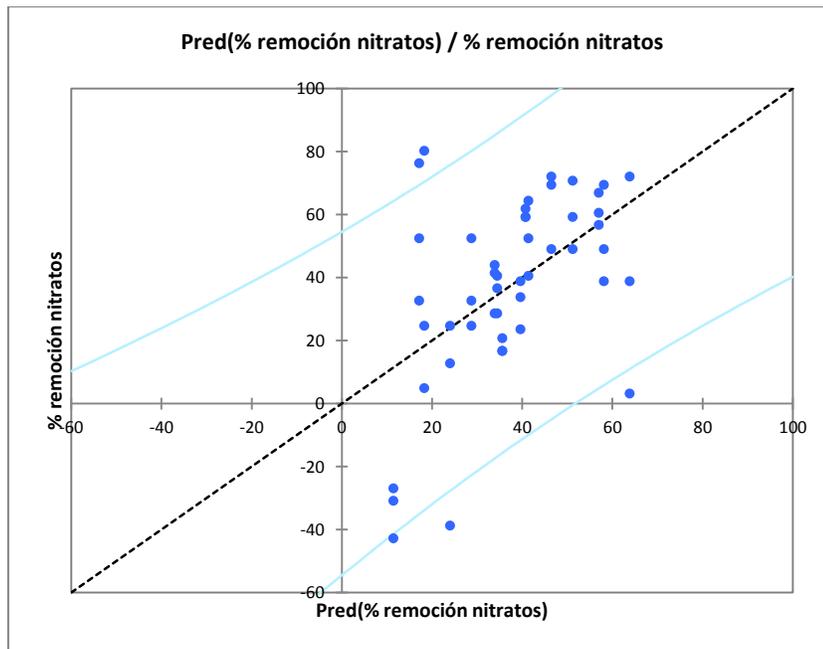
Fuente: elaboración propia, empleado XLSta.

Tabla XXXIV. **Estadísticos de bondad de ajuste para % de remoción de nitratos**

GL	44 000
R ²	0 263
Desv. típica	26 057
MEC	622 381
RMSE	24 948

Fuente: elaboración propia.

Figura 36. **Gráfico de puntos para realizar modelo de % de remoción nitratos**



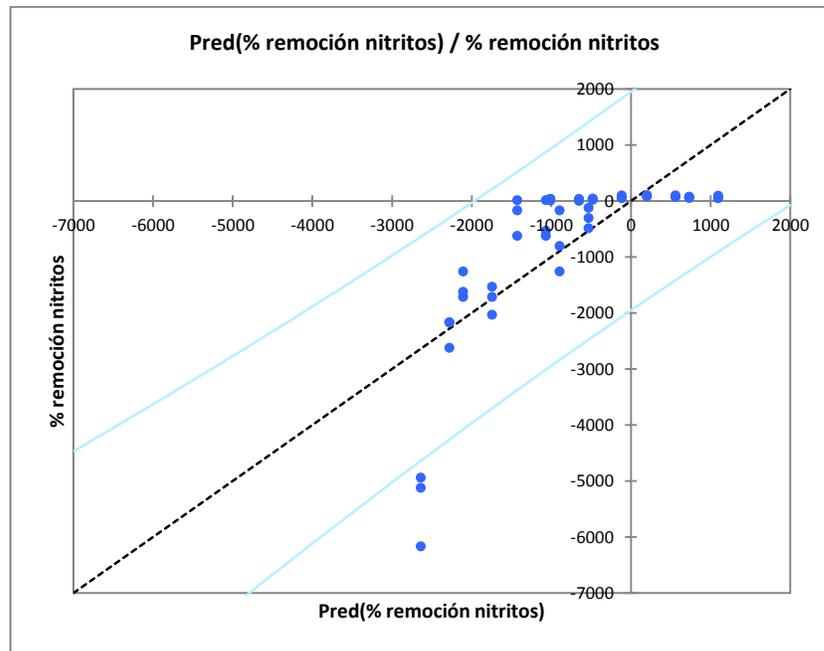
Fuente: elaboración propia, empleando XLStat.

Tabla XXXV. **Estadísticos de bondad de ajuste para % de remoción de nitritos**

GL	44 000
R ²	0 559
Desv. típica	986 611
MEC	892 284 899
RMSE	944 608

Fuente: elaboración propia.

Figura 37. **Gráfico de puntos para realizar modelo de % de remoción nitritos**



Fuente: elaboración propia, empleando XLStat

CONCLUSIONES

1. Se logró elaborar el modelo matemático en base a los análisis obtenidos por medio del método de regresión por mínimos cuadrados parciales, donde se determinaron 4 ecuaciones que predicen el % de remoción de nutrientes por separado. De esta manera se tiene una correlación entre todas las variables cercanas a 1, que dan un resultado más confiable.
 - % de remoción de amonio = $0,97610385297762 + 3,23638430215705 * \text{amonio} - 0,224205608221564 * \text{fosfatos} + 0,228997815081206 * \text{nitratos} - 20,00719670879 * \text{nitritos}$
 - % de remoción de fosfatos = $142,869537738514 - 1,38498241235932 * \text{amonio} - 5,38963973392522E-02 * \text{fosfatos} - 1,05585539721351 * \text{nitratos} + 10,5815161413411 * \text{nitritos}$
 - % de remoción de nitratos = $- 19,6221544068836 - 0,347599135679979 * \text{amonio} + 9,37059324778441E-02 * \text{fosfatos} + 0,56217683123565 * \text{nitratos} - 4,73756582157699 * \text{nitritos}$
 - % de remoción de nitritos = $- 874,128445012166 + 73,4299427994858 * \text{amonio} - 1,95839175350234 * \text{fosfatos} - 13,3597977447721 * \text{nitratos} + 1122,27788749952 * \text{nitritos}$

2. Se lograron identificar los factores que influyen en la variable respuesta en cuanto a concentraciones de mínimos y máximos de cada uno de los nutrientes. Fueron los siguientes:
 - Para lograr remociones significativas de amonio se requiere del efecto de amonio a concentración máxima, fosfatos a concentración mínima y nitritos a concentración mínima.
 - Para lograr remociones significativas de fosfatos se requiere del efecto de nitratos a concentración mínima.
 - Para lograr remociones significativas de nitratos se requiere del efecto de nitratos a concentración máxima.
 - En el caso de nitritos ningún factor puede considerarse, ya que en general las remociones fueron negativas (es decir no hubo remoción de nitritos), aunque con las concentraciones máximas de amonio y nitritos, se logran los porcentajes más favorables.
3. Se realizaron ensayos de laboratorio a muestras de agua recolectadas en la planta de tratamiento de aguas residuales de la USAC, para obtener, mediante lecturas de datos, bases y alteraciones programadas, confirmaciones de niveles de nutrientes presentes o generadas por el sistema de tratamiento; dichos datos fueron la plataforma para poder observar el comportamiento de los mismos y poder generar tablas y gráficos mostrando los porcentajes de remoción de nutrientes proporcionalmente al crecimiento de la biomasa.

4. La realización de un análisis multivariable fue verificado para tener conocimiento del comportamiento al relacionar unas variables con otras. Esto se logró teniendo un rango entre mínimos y máximos de cada nutriente y obtener mezclas no solo entre límites sino entre nutrientes con ambos niveles de concentración. La temperatura ambiental y la radiación solar fueron variables que si bien es cierto no están al mismo nivel de intensidad siempre, no presentaron valores con rangos excesivamente amplios como para integrar esta variable dentro del análisis, por tener un comportamiento más o menos semejante.⁵⁵

⁵⁵ GUERRA HERBER. Zea. *Marioidentificación de presencia de algas generadas en los efluentes del sistema de filtros percoladores de la planta de tratamiento Ing. Arturo Pasos Sosa, para uso potencial en remoción de nitrógeno y fosforo presentes en el agua residual.* p.96.

RECOMENDACIONES

1. Probar al mismo tiempo y con las mismas muestras de agua 3 dispositivos de remoción de nutrientes investigados (lagunas sin mecanización, lagunas tipo carrusel y fotobiorreactores) para comparar la eficiencia de cada uno.
2. Realizar varios experimentos en verano, invierno y transición de épocas, para poder ver si la lluvia tiene una influencia en el crecimiento de las mismas, especialmente en el período de lluvia ácida.
3. Trabajar las muestras de agua bajo condiciones ideales y alterar ciertos parámetros como inoculación específica de *Chlorella Sp*, temperatura y radiación, para evaluar contra condiciones naturales.

BIBLIOGRAFÍA

1. ABRAIRA SANTOS, Victor. *Metodos multivirables en bioestadística.*, España: Centro de Estudios Ramon Areces, 1996. 470 p.
2. ANAN MURALI, Narasimhan. *Microalgal bioremediation of nurtients in wastewater and carbon dioxide en flue gas*, tesis, Missouri University: 2010. 78 p.
3. BERMEO CASTILLO, Lorena. *Estudio del cosechado de cultivos de microalgas en agua residual mediante tecnicas de centrifugado.* España: Universidad Técnica particular de la Loja , 2011. 44 p.
4. BILTON, George. *Wastewater microbiology.* United States of America: John Wiley & Sons, Inc. 2005. 369 p.
5. CARDOZA MEZA, Dora María. *Tesario de estudios especiales de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos de la Universidad de San Carlos de Guatemala (1974-2013).* Guatemala: ERIS-USAC. 2015. 158 p.
6. CHACON, Carmen; ANDRADE, Charity. *Uso de Chlorella sp, y scenedesmus sp en la remocion de nitrogeno, fosforo y DQO de aguas residuales urbanas de Maracaibo Venezuela.* Venezuela: Centro de investigacion del Agua, Universidad de Zulia Maracaibo. 2002. 15 p.

7. CHO, S.; LUONG, T. T.; LEE, D. *Reuse of effluent water from a municipal wastewater treatment plant in microalgae cultivation for biofuel production*. Korea: Elsevier Ltd, 2011. 475 p.
8. CRITES, Raul; TCHOBANOGLOUS, Guisell. *Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones*. Colombia; McGraw-Hill, 2000. 147 p.
9. GARCIA TRUJILLO Zack. *Comparación y evaluación de tres plantas acuáticas para determinar la eficiencia de remoción de nutrientes en el tratamiento de aguas residuales domésticas*. Perú: Universidad Nacional de Ingeniería. 2012. 80 p.
10. GUERRA, Herber. *Zea. Marioidentificación de presencia de algas generadas en los efluentes del sistema de filtros percoladores de la planta de tratamiento Ing. Arturo Pasos Sosa, para uso potencial en remoción de nitrógeno y fosforo presentes en el agua residual. Guatemala. 2015.*
11. HERNANDEZ REYES, Brandon; RODRIGUEZ PALACIO, María; LOZANO RAMIREZ, Carmen; CASTILLA HERNANDEZ, P. *Remoción de nutrientes por tres cultivos de microalgas libres e inmovilizados*. Revista Latinoamericana. 2012.
12. HERNANDEZ SANCHEZ, J. *Evaluación de un sistema de microalgas y bacterias para la eliminación de nutrientes de las aguas residuales domésticas*. México: Instituto Politécnico Nacional. 2004.

13. KRISHNA, A. R.; DEV, L.; THANKAMANI, V. *An integrated process for industrial effluent treatment and Biodiesel production using microalgae*. India. 2012.
14. KUEHL, R. *Diseño de experimentos. Principios estadísticos de diseño y análisis de investigación*. Segunda Edición. México: Thomson Editores, S.A. de C.V. 2001. 489 p.
15. LARA BORRERO, Jaime. *Eliminación de nutrientes mediante procesos de membrana*. España: Universidad Politecnica de Madrid, 2002. 357 p.
16. MADHAB MAHAPATRA Durga. *Sustainable algal scum management and wastewater treatment in bangalore*,: India: Centro de infrastructure, sostenibilidad transporte y planificación urbana. 2012. 12 p.
17. MENDEZ SUAZA, Lucas; ALBARRACIN CRAVERO, Ivan. *Crecimiento de Scenedesmus Quadricauda en efluentes cloacales de la ciudad de Trelew*. Colombia: Universidad Colegio Mayor, 2012. 96 p.
18. METCALF, Eddy. *Ingeniería de aguas residuales, redes de alcantarillado y bombeo*. España; McGraw-Hill, 1995.
19. _____. *Ingeniería de aguas residuales, tratamiento, vertido y Reutilización*. 3a ed. México; McGraw-Hill interamericana. 1996.

20. MONGE NAJERA, Joaquín; GOMEZ FIGUREOA, Patricia; RIVAS ROSSI, Miranda. *Biología General*. Costa Rica: editorial Universitaria Estatal a Distancia, 2005. 159 p.
21. MORENO, Marín. *Fotobiorreactor cerrado como metodo de depuración de aguas residuales urbanas* Sevilla: Escuela Universitaria de Ingenieros Tecnicos Agrícolas de la Universidad de Sevilla 2008. 251 p.
22. MORENO MARIN, Alexander. (2008). *Fotobiorreactor cerrada como método de depuración de aguas residuales urbanas*. Sevilla: Escuela Universitaria de Ingenieros Técnicos Agrícolas de la Universidad de Sevilla.
23. MORENO, Mauricio. *Evaluación de dos métodos para la reducción de nitrógeno, fósforo y DQO de aguas residuales, mediante un cultivo axenico de cianobacterias y un consorcio microbiano, inmovilizados y en suspensión* : Departamento de Ciencias de la vida, Centro de investigaciones científicas. Escuela Politécnica del Ejercito 2010. 55- 61 p
24. MUCH SANTOS, Z. *Manual de laboratorio. Curso de Maestría en Ingeniería Sanitaria*. USAC, ERIS.
25. NARASIMHAN, A. M. *Microalgal bioremediation of nutrientes in waste wáter and carbón dioxide en flue gas*. Missouri. Estados Unidos: Missouri of science in Environmental Engineering, 2010. 258 p.

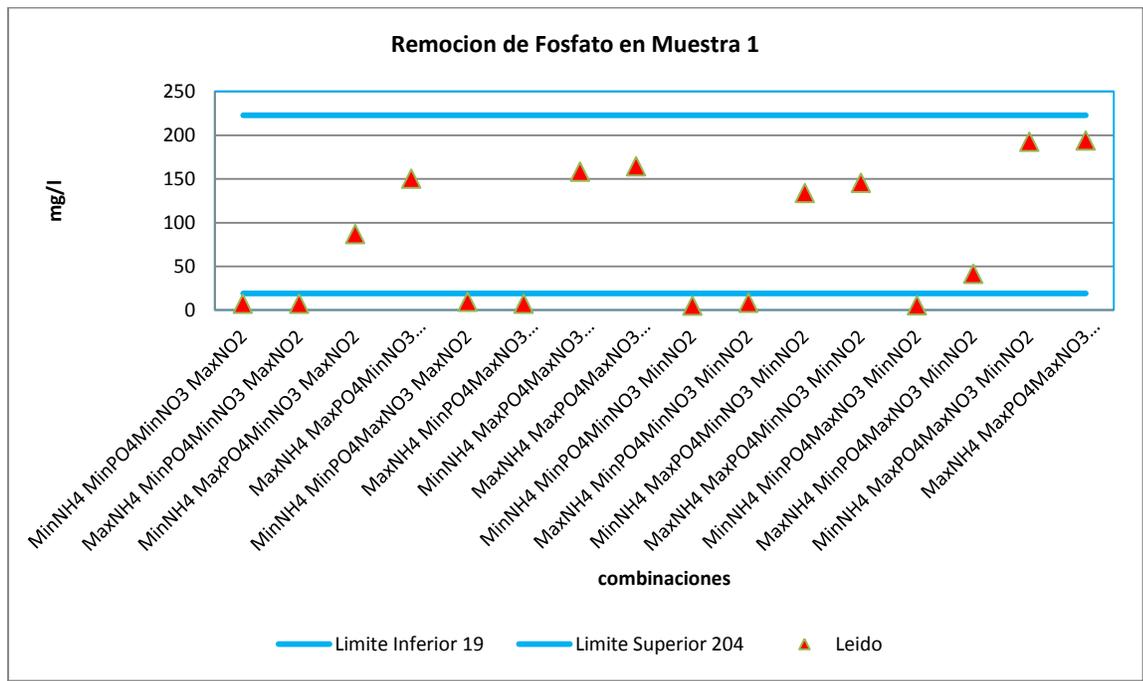
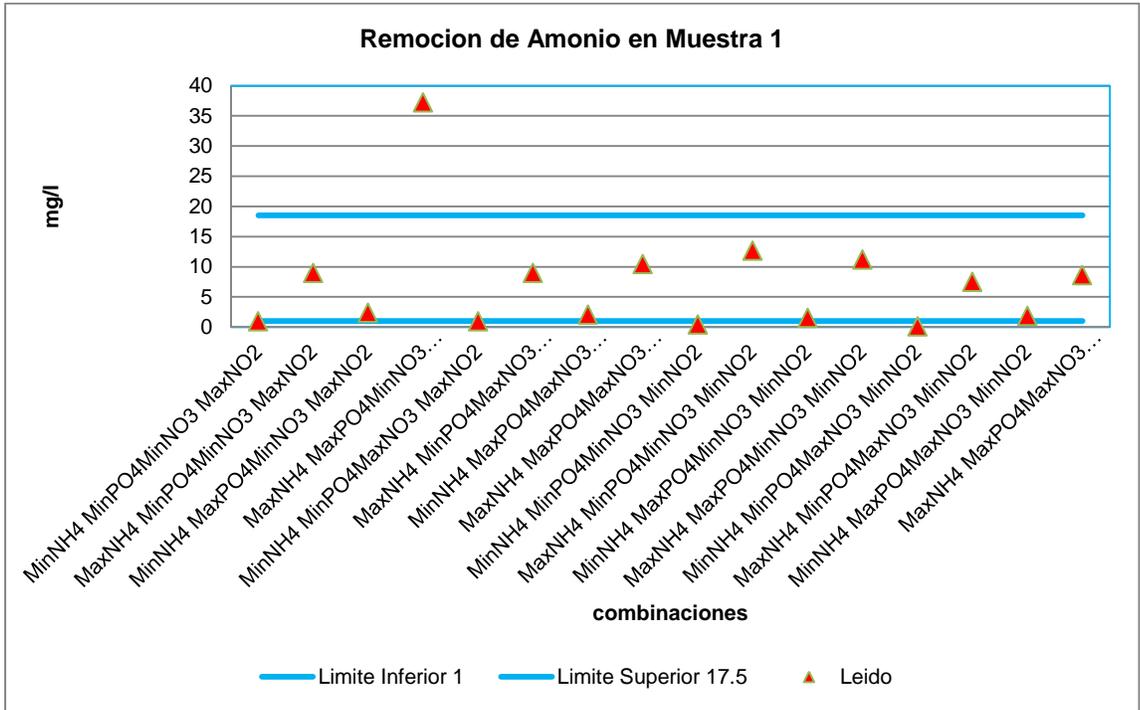
26. P MCCULLAGH & J.A NELDER. *Generalized linear models*. New York: Segunda edición , 1983. 506 p.
27. RUIZ MARIN, Anthony. Mendoza Espinosa. (2009). Growth and nutrient removal in free and immobilized Green algae in batch and semi-continues cultures treating real wastewater. USA.
28. MARTÍNEZ, Ruíz. *Puesta en marcha de un cultivo de microalgas para la eliminación de nutrientes de un agua residual urbana previamente tratada anaeróbicamente*. España: Universidad Politécnica de Valencia, 2011. 346 p.
29. SALAZAR GONZÁLEZ, Margaret. *Sistemas integrales de tratamiento de aguas residuales, mediante el uso combinado de digestión anaerobia y microalgas*. España: 2009. 478 p.
30. SRIRAM, Susan; SEENIVASAN, Ramón. *Microalgae cultivation in wastewater for nutrient removal. Journal of algal biomass utilization*. Alemania. 2005.
31. SUBIR, Ghosh *Multivariate analysis, design of experiments, and survey sampling*. Texas: Department of Statistics , 1991. 659 p.
32. VILLASEÑOR CAMACHO, Jane. *Eliminación biológica de fósforo en aguas residuales urbanas*. España: Universidad de Castilla, 2001. 328 p.

APÉNDICE

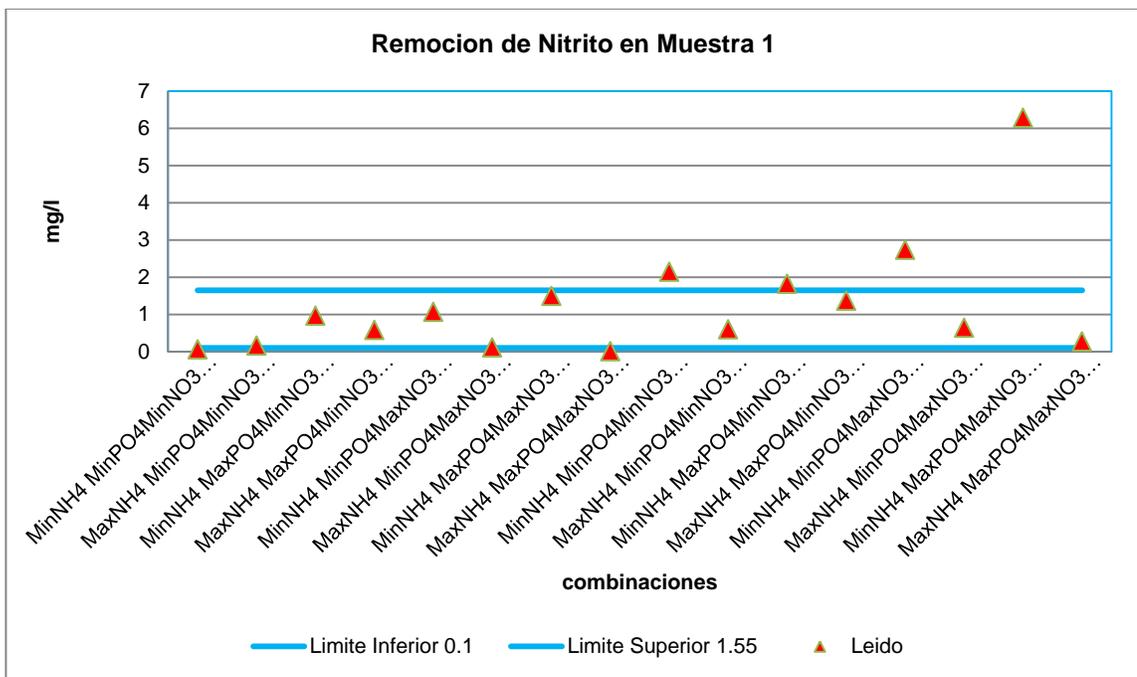
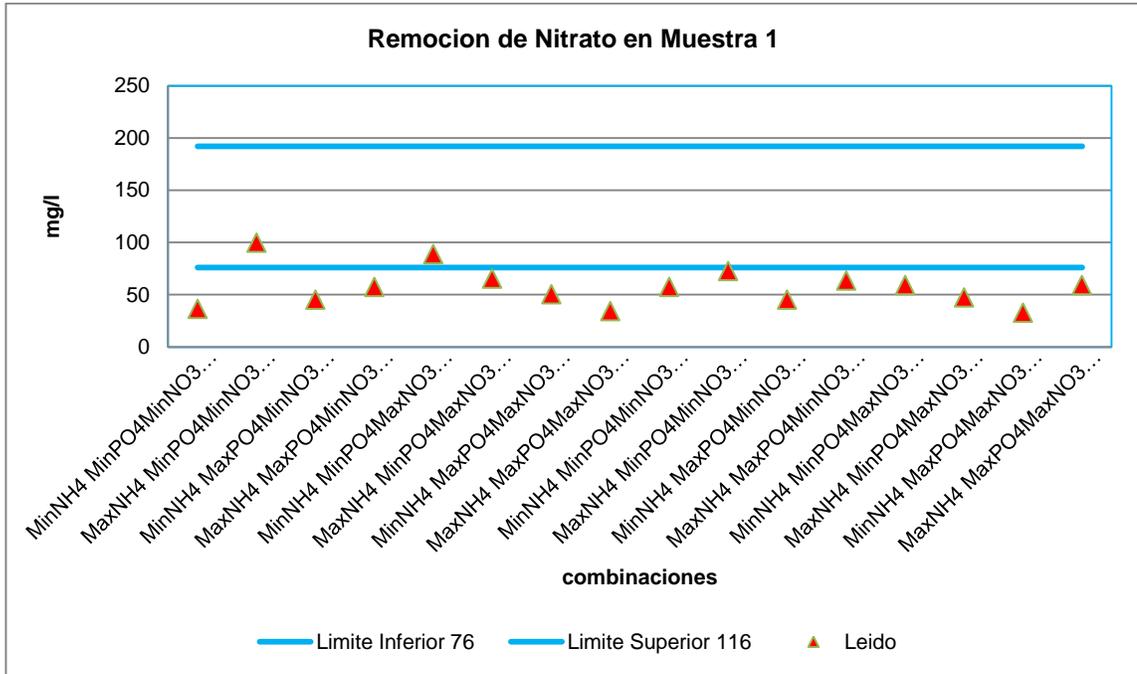
Apéndice 1. **Combinaciones de máximos y mínimos en muestra de agua núm. 1**

COMBINACIONES	NH ₄ (mg/l)			PO ₄ (mg/l)			NO ₃ (mg/l)			NO ₂ (mg/l)		
	Inicial	Leído	% Removido	Inicial	Leído	% Removido	Inicial	Leído	% Removido	Inicial	Leído	% Removido
Manti ₄ MiPQ ₄ MiNO ₃ MiNO ₂	100	0.95	4.76	19.00	7.08	62.75	76.00	36.19	52.38	1.55	0.05	96.56
Manti ₄ MiPQ ₄ MiNO ₃ MiNO ₂	17.50	8.94	48.94	19.00	7.08	62.75	76.00	99.52	-30.95	1.55	0.16	89.69
Manti ₄ MiPQ ₄ MiNO ₃ MiNO ₂	100	2.33	-133.33	204.00	87.04	57.33	76.00	45.24	40.48	1.55	0.96	38.14
Manti ₄ MiPQ ₄ MiNO ₃ MiNO ₂	17.50	37.23	-112.77	204.00	150.35	26.30	76.00	57.30	24.60	1.55	0.58	62.54
Manti ₄ MiPQ ₄ MiNO ₃ MiNO ₂	100	0.95	4.76	19.00	9.26	51.29	116.00	88.78	23.47	1.55	1.07	31.27
Manti ₄ MiPQ ₄ MiNO ₃ MiNO ₂	17.50	8.94	48.94	19.00	7.08	62.75	116.00	65.10	43.88	1.55	0.11	93.13
Manti ₄ MiPQ ₄ MiNO ₃ MiNO ₂	100	2.05	-104.76	204.00	158.26	22.42	116.00	50.31	56.63	1.55	1.49	3.78
Manti ₄ MiPQ ₄ MiNO ₃ MiNO ₂	17.50	10.43	40.43	204.00	164.59	19.32	116.00	34.03	70.66	1.55	0.00	99.90
Manti ₄ MiPQ ₄ MiNO ₃ MiNO ₂	100	0.38	61.90	19.00	5.12	73.07	76.00	57.30	24.60	0.10	2.14	-2036.36
Manti ₄ MiPQ ₄ MiNO ₃ MiNO ₂	17.50	12.66	27.66	19.00	8.17	57.02	76.00	72.38	4.76	0.10	0.59	-490.91
Manti ₄ MiPQ ₄ MiNO ₃ MiNO ₂	100	1.52	-52.38	204.00	133.73	34.45	76.00	45.24	40.48	0.10	1.82	-1718.18
Manti ₄ MiPQ ₄ MiNO ₃ MiNO ₂	17.50	11.17	36.17	204.00	145.60	28.63	76.00	63.33	16.67	0.10	1.36	-1263.64
Manti ₄ MiPQ ₄ MiNO ₃ MiNO ₂	100	0.10	90.48	19.00	5.44	71.35	116.00	59.18	48.98	0.10	2.73	-2627.27
Manti ₄ MiPQ ₄ MiNO ₃ MiNO ₂	17.50	7.45	57.45	19.00	41.38	-117.77	116.00	47.35	59.18	0.10	0.64	-536.36
Manti ₄ MiPQ ₄ MiNO ₃ MiNO ₂	100	1.81	-80.95	204.00	192.29	5.74	116.00	32.55	71.94	0.10	6.27	-6172.73
Manti ₄ MiPQ ₄ MiNO ₃ MiNO ₂	17.50	8.56	51.06	204.00	193.87	4.97	116.00	59.18	48.98	0.10	0.27	-172.73

Continuación del apéndice 1.

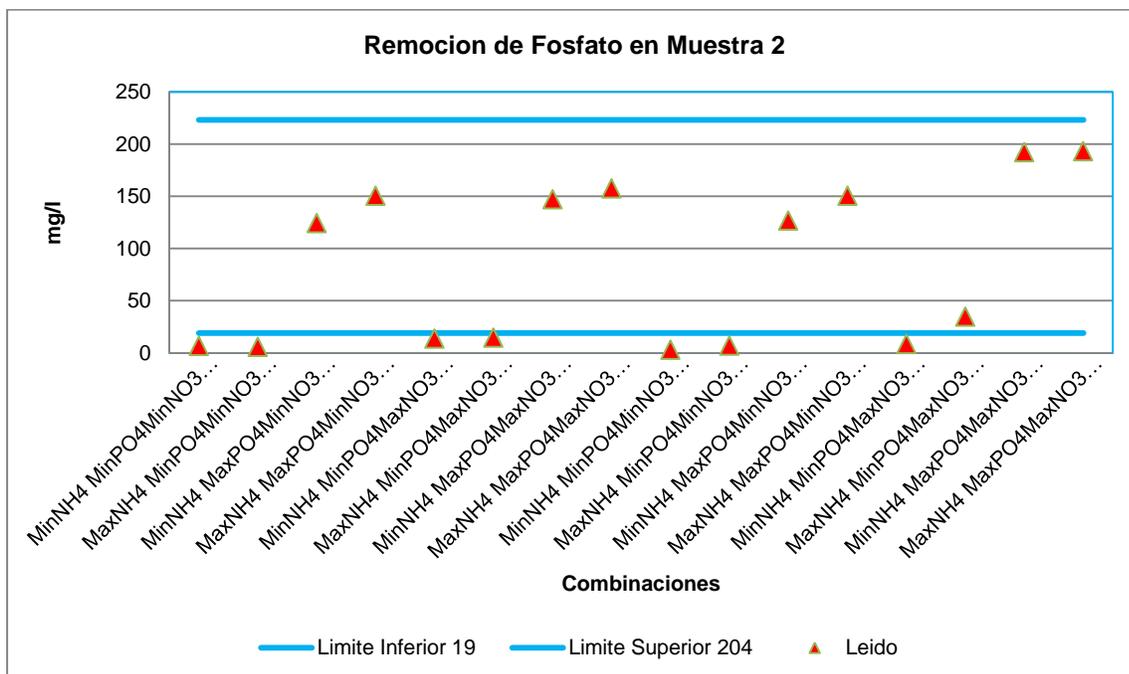
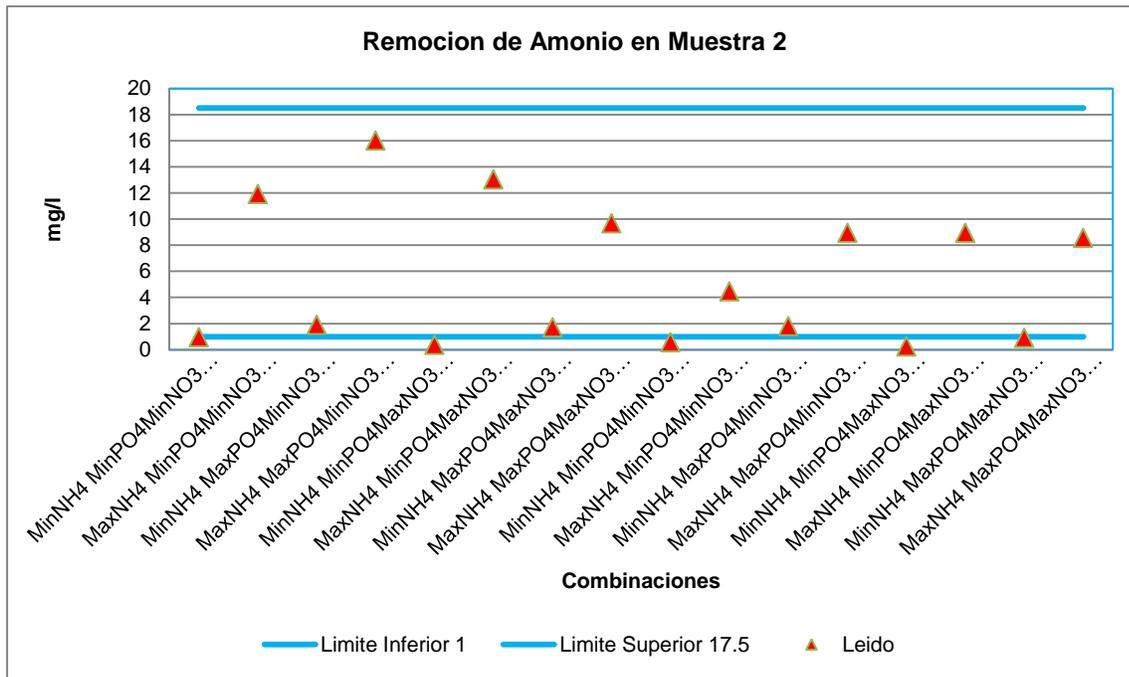


Continuación del apéndice 1.

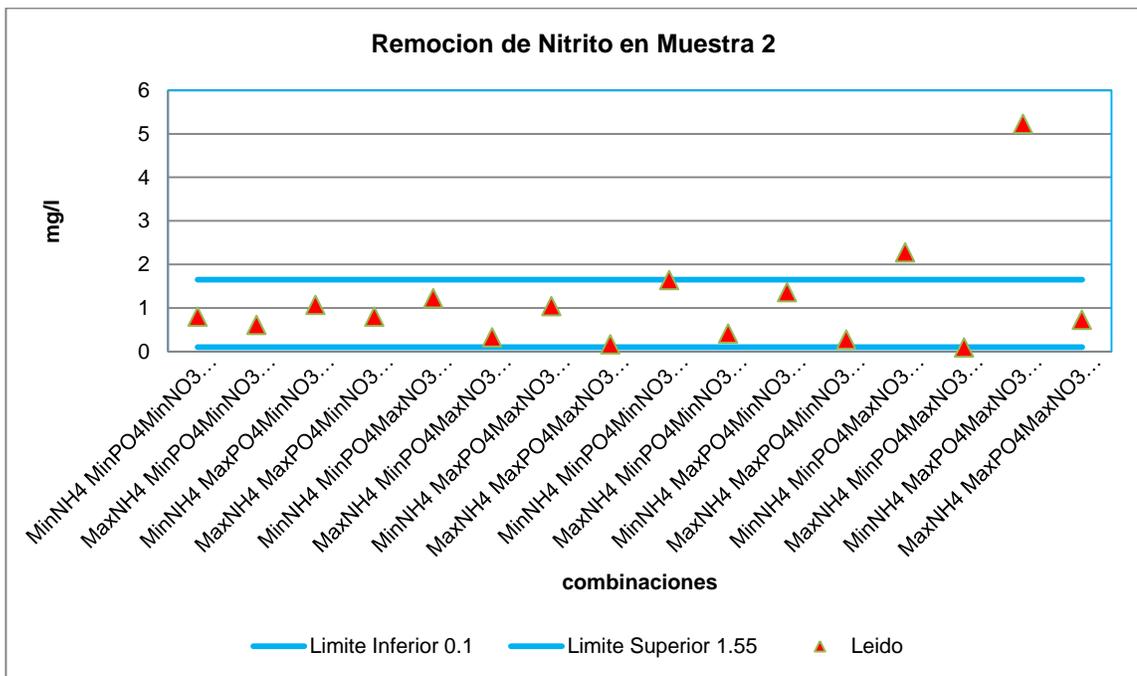
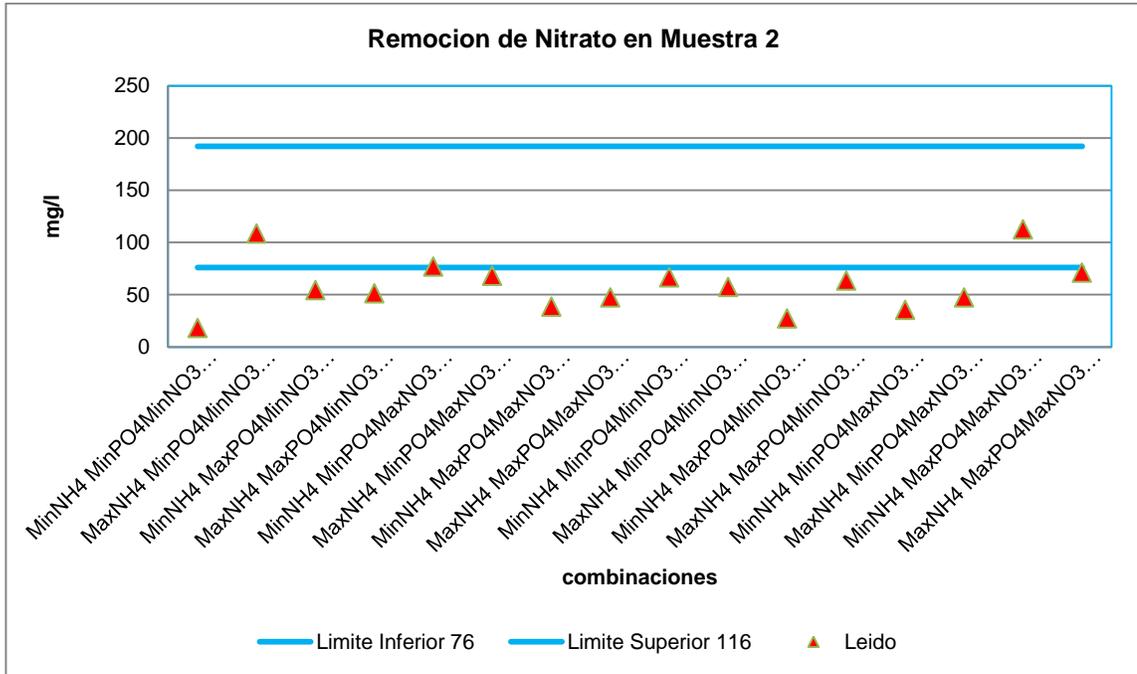


Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. **Combinaciones de maximos y mínimos en muestra de agua núm 2.**



Continuación del apéndice 2.

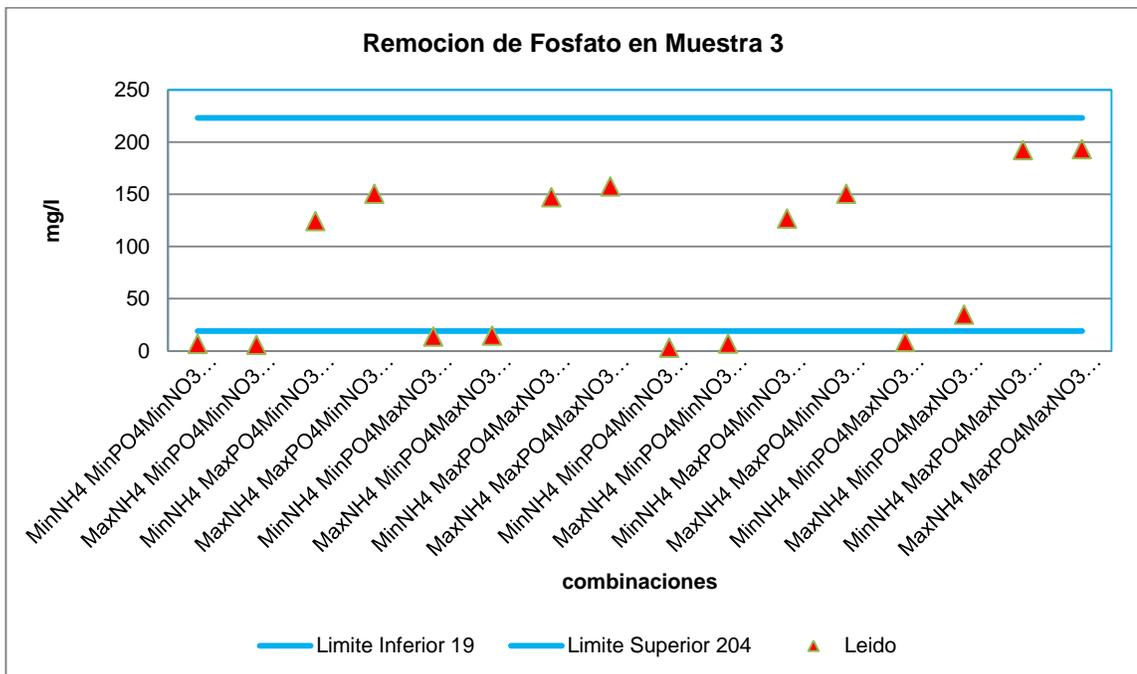
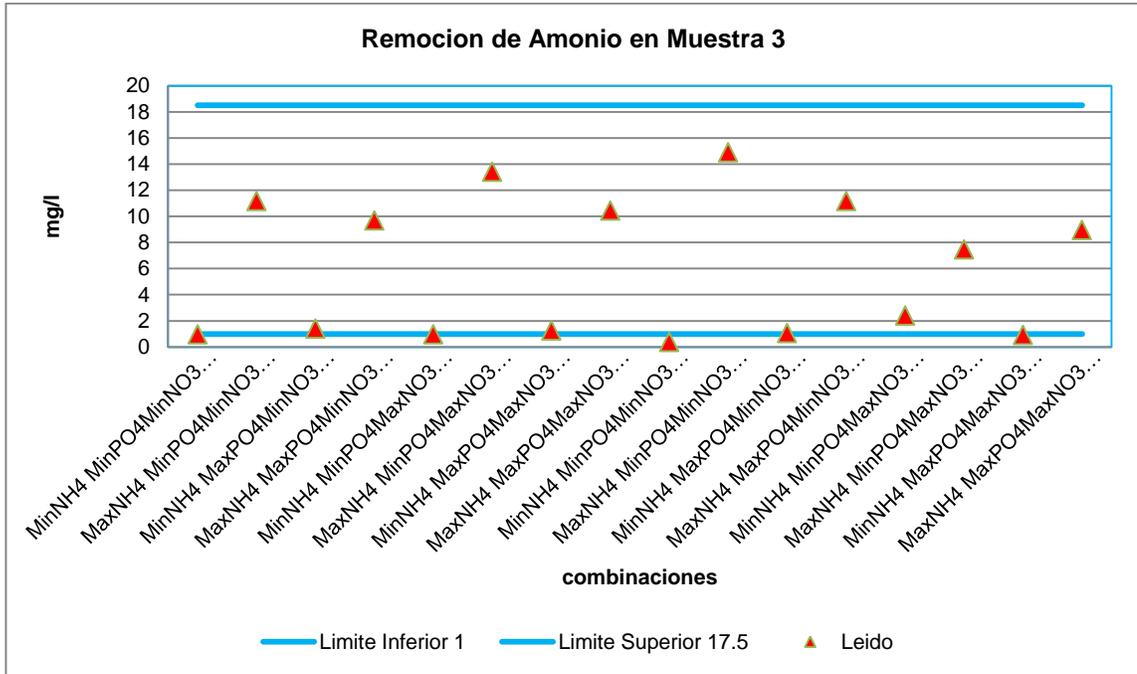


Fuente: elaboración propia.

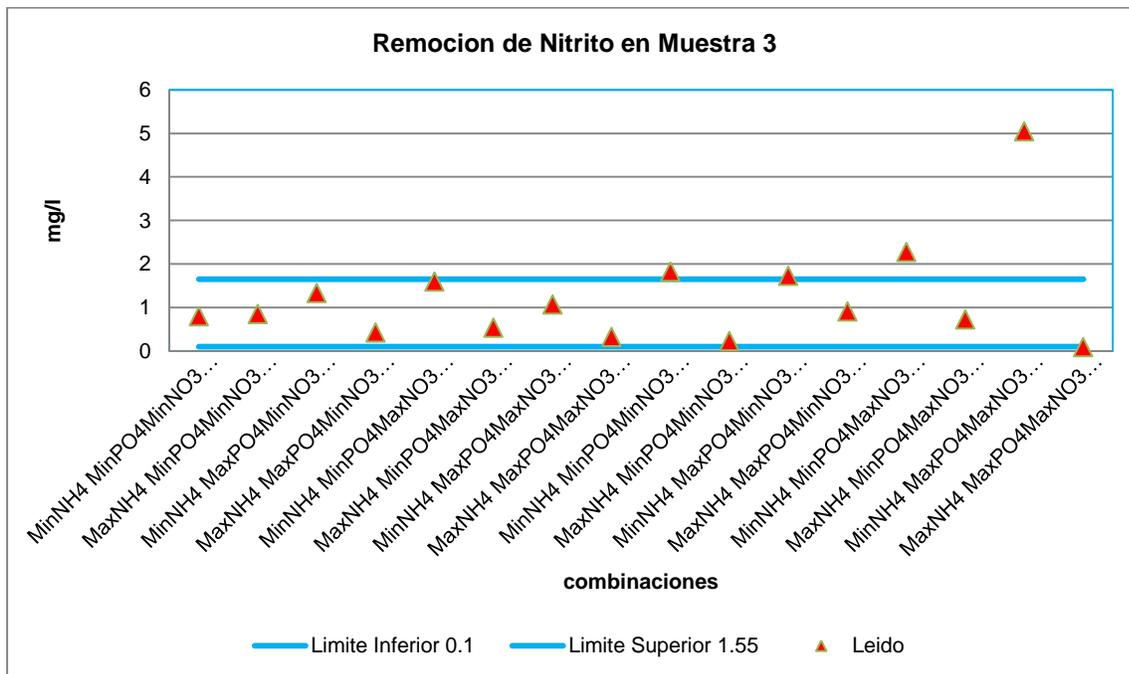
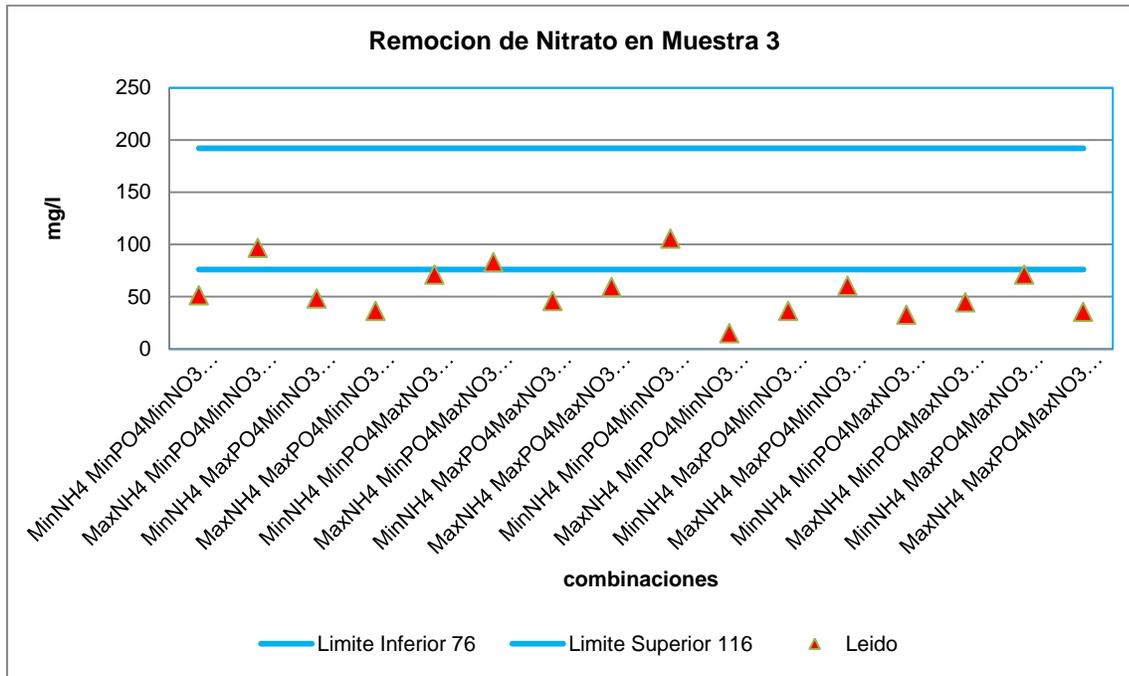
Apéndice 3. **Combinaciones de máximos y mínimos en muestra de agua núm. 3**

COMBINACIONES	NH ₄ (mg/l)			PO ₄ (mg/l)			NO ₂ (mg/l)			NO ₃ (mg/l)		
	Inicial	Leído	% Removido	Inicial	Leído	% Removido	Inicial	Leído	% Removido	Inicial	Leído	% Removido
MinNH ₄ MinPO ₄ MinNO ₂ MaxNO ₂	1.00	0.95	4.76	19.00	6.81	64.18	76.00	51.27	32.54	1.55	0.80	48.45
MaxNH ₄ MinPO ₄ MinNO ₂ MaxNO ₂	17.50	11.17	36.17	19.00	5.99	68.48	76.00	96.51	-26.98	1.55	0.85	45.02
MinNH ₄ MaxPO ₄ MinNO ₂ MaxNO ₂	1.00	1.38	-38.10	204.00	124.24	39.10	76.00	48.25	36.51	1.55	1.33	14.09
MaxNH ₄ MaxPO ₄ MinNO ₂ MaxNO ₂	17.50	9.68	44.68	204.00	150.35	26.30	76.00	36.19	52.38	1.55	0.43	72.51
MinNH ₄ MinPO ₄ MaxNO ₂ MaxNO ₂	1.00	0.95	4.76	19.00	13.61	28.37	116.00	71.02	38.78	1.55	1.60	-3.09
MaxNH ₄ MinPO ₄ MaxNO ₂ MaxNO ₂	17.50	13.40	23.40	19.00	14.70	22.64	116.00	82.86	28.57	1.55	0.53	65.64
MinNH ₄ MaxPO ₄ MinNO ₂ MaxNO ₂	1.00	1.24	-23.81	204.00	147.18	27.85	116.00	45.87	60.46	1.55	1.07	31.27
MaxNH ₄ MaxPO ₄ MaxNO ₂ MaxNO ₂	17.50	10.43	40.43	204.00	157.47	22.81	116.00	59.18	48.98	1.55	0.32	79.38
MinNH ₄ MinPO ₄ MinNO ₂ MinNO ₂	1.00	0.38	61.90	19.00	2.99	84.24	76.00	105.56	-38.89	0.10	1.82	-1718.18
MaxNH ₄ MinPO ₄ MinNO ₂ MinNO ₂	17.50	14.89	14.89	19.00	7.08	62.75	76.00	15.08	80.16	0.10	0.23	-127.27
MinNH ₄ MaxPO ₄ MinNO ₂ MinNO ₂	1.00	1.05	-4.76	204.00	126.61	37.94	76.00	36.19	52.38	0.10	1.73	-1627.27
MaxNH ₄ MaxPO ₄ MinNO ₂ MinNO ₂	17.50	11.17	36.17	204.00	150.35	26.30	76.00	60.32	20.63	0.10	0.91	-809.09
MinNH ₄ MinPO ₄ MaxNO ₂ MinNO ₂	1.00	2.38	-138.10	19.00	8.71	54.15	116.00	32.55	71.94	0.10	2.27	-2172.73
MaxNH ₄ MinPO ₄ MaxNO ₂ MinNO ₂	17.50	7.45	57.45	19.00	34.84	-83.38	116.00	44.39	61.73	0.10	0.73	-627.27
MinNH ₄ MaxPO ₄ MaxNO ₂ MinNO ₂	1.00	0.90	9.52	204.00	192.29	5.74	116.00	71.02	38.78	0.10	5.05	-4945.45
MaxNH ₄ MaxPO ₄ MaxNO ₂ MinNO ₂	17.50	8.94	48.94	204.00	193.08	5.35	116.00	35.51	69.39	0.10	0.09	9.09

Continuación del apéndice 3.



Continuación del apéndice 3.



Apéndice 4. **Resumen de análisis de remoción de fosfatos con concentración de amonio y concentración de fosfatos**

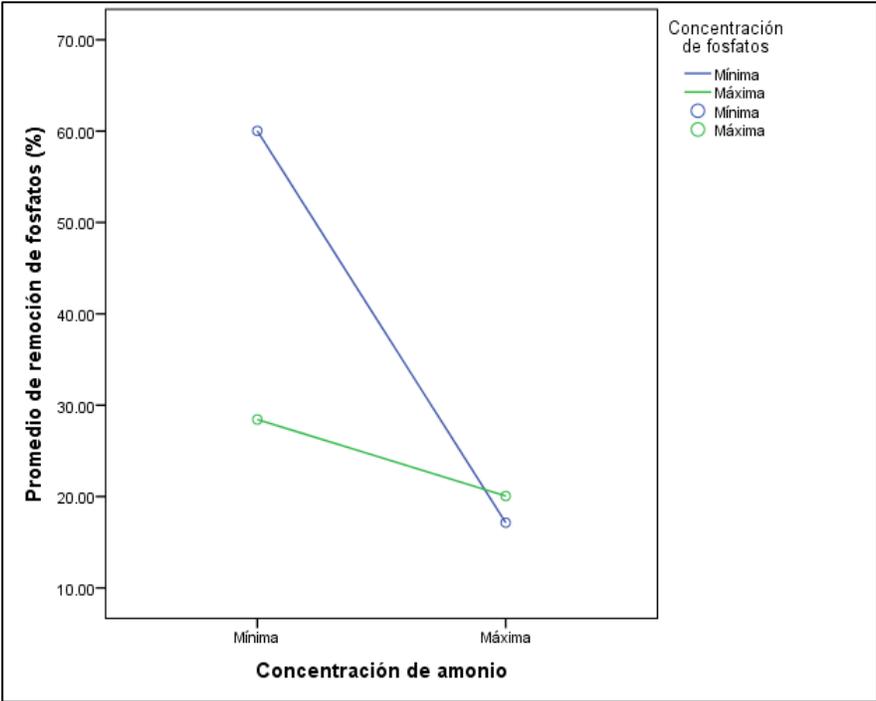
Resúmenes de casos

Remoción de fosfatos (%)

Concentraciones de amonio	Concentraciones de fosfatos	N	Media	Desviación estándar
Mínima	Mínima	12	60,0283	18,24710
	Máxima	12	28,4333	16,12826
	Total	24	44,2308	23,32503
Máxima	Mínima	12	17,1442	69,83932
	Máxima	12	20,0617	9,26519
	Total	24	18,6029	48,74432
Total	Mínima	24	38,5863	54,51353
	Máxima	24	24,2475	13,55523
	Total	48	31,4169	39,95822

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 5. **Porcentaje de remoción de fosfato vs concentraciones de fosfato y amonio**



Fuente: elaboración propia, empleando SPSS.

Apéndice 6. **Resumen de análisis de remoción de fosfatos con concentración amonio y concentración de nitratos**

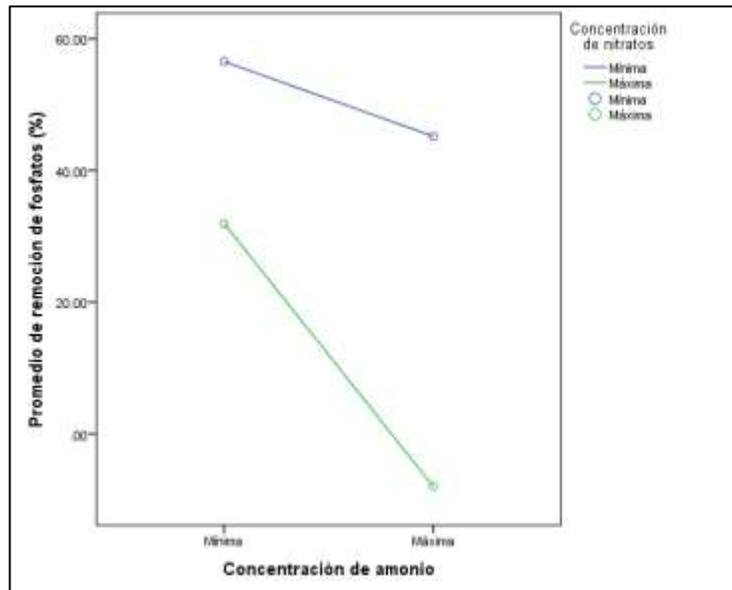
Resúmenes de casos

Remoción de fosfatos (%)

Concentraciones de amonio	Concentraciones de nitratos	N	Media	Desviación estándar
Mínima	Mínima	12	56,5433	18,46851
	Máxima	12	31,9183	21,58078
	Total	24	44,2308	23,32503
Máxima	Mínima	12	45,1967	19,55935
	Máxima	12	-7,9908	55,15802
	Total	24	18,6029	48,74432
Total	Mínima	24	50,8700	19,48542
	Máxima	24	11,9638	45,75262
	Total	48	31,4169	39,95822

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 7. **Porcentaje de remoción fosfato vs concentraciones de nitrato y amonio**



Fuente: elaboración propia, empleando SPSS

Apéndice 8. **Resumen de análisis de remoción de fosfatos con concentración amonio y concentración de nitritos**

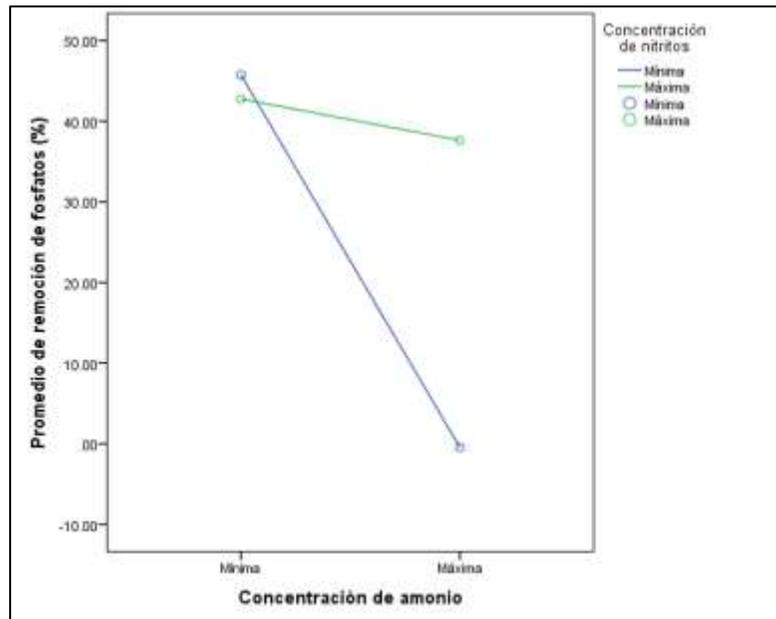
Resúmenes de casos

Remoción de fosfatos (%)

Concentraciones de amonio	Concentraciones de nitritos	N	Media	Desviación estándar
Mínima	Mínima	12	45,7292	29,47711
	Máxima	12	42,7325	16,24118
	Total	24	44,2308	23,32503
Máxima	Mínima	12	-.4258	61,18783
	Máxima	12	37,6317	20,83376
	Total	24	18,6029	48,74432
Total	Mínima	24	22,6517	52,55352
	Máxima	24	40,1821	18,45341
	Total	48	31,4169	39,95822

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 9. **Porcentaje de remoción fosfato vs concentraciones de nitritos y amonio**



Fuente: elaboración propia, empleando SPSS.

Apéndice 10. **Resumen de análisis de remoción de fosfatos con concentración fosfatos y concentración de nitratos**

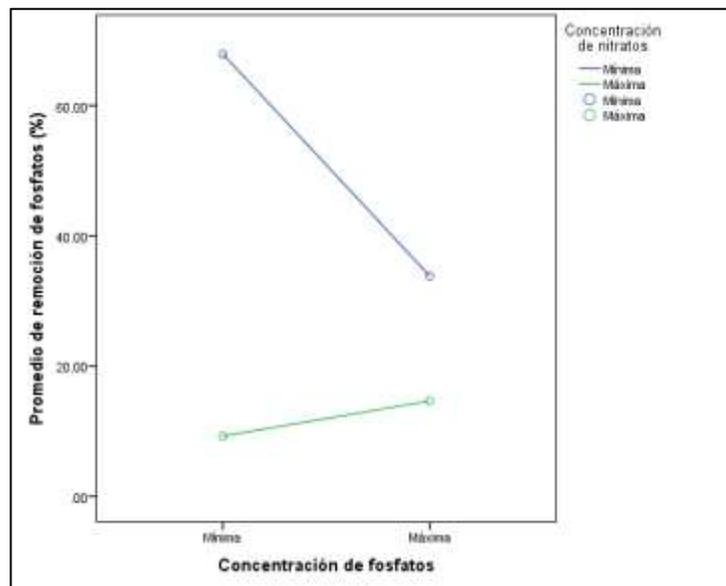
Resúmenes de casos

Remoción de fosfatos (%)

Concentraciones de fosfatos	Concentraciones de nitratos	N	Media	Desviación estándar
Mínima	Mínima	12	67,9075	8,59986
	Máxima	12	9,2650	65,29826
	Total	24	38,5863	54,51353
Máxima	Mínima	12	33,8325	9,30547
	Máxima	12	14,6625	9,85660
	Total	24	24,2475	13,55523
Total	Mínima	24	50,8700	19,48542
	Máxima	24	11,9638	45,75262
	Total	48	31,4169	39,95822

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 11. **Porcentaje de remoción fosfato vs concentraciones de fosfatos y nitratos**



Fuente: elaboración propia, empleando SPSS.

Apéndice 12. **Resumen de análisis de remoción de fosfatos con concentración fosfatos y concentración de nitritos**

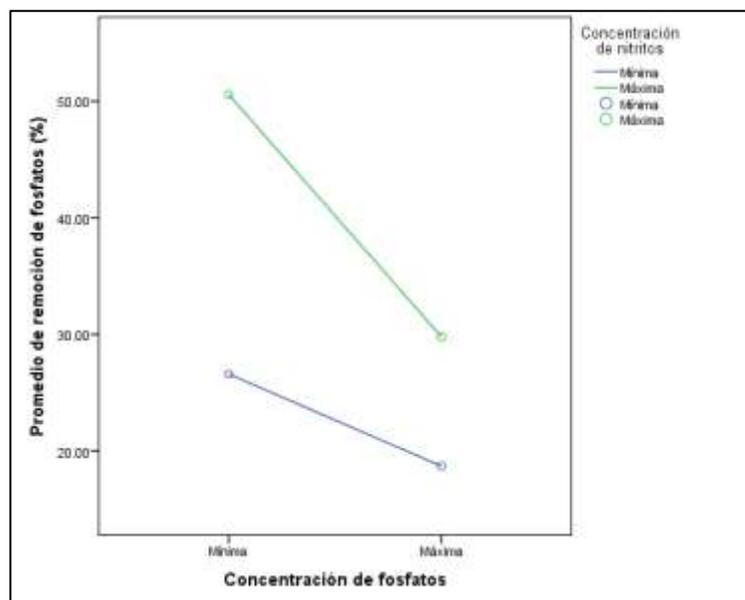
Resúmenes de casos

Remoción de fosfatos (%)

Concentraciones de fosfatos	Concentraciones de nitritos	N	Media	Desviación estándar
Mínima	Mínima	12	26,5992	74,40533
	Máxima	12	50,5733	19,07742
	Total	24	38,5863	54,51353
Máxima	Mínima	12	18,7042	14,30634
	Máxima	12	29,7908	10,60553
	Total	24	24,2475	13,55523
Total	Mínima	24	22,6517	52,55352
	Máxima	24	40,1821	18,45341
	Total	48	31,4169	39,95822

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 13. **Porcentaje de remoción fosfato vs concentraciones de fosfatos y nitritos**



Fuente: elaboración propia, empleando SPSS.

Apéndice 14. **Resumen de análisis de remoción de fosfatos con concentración nitratos y concentración de nitritos**

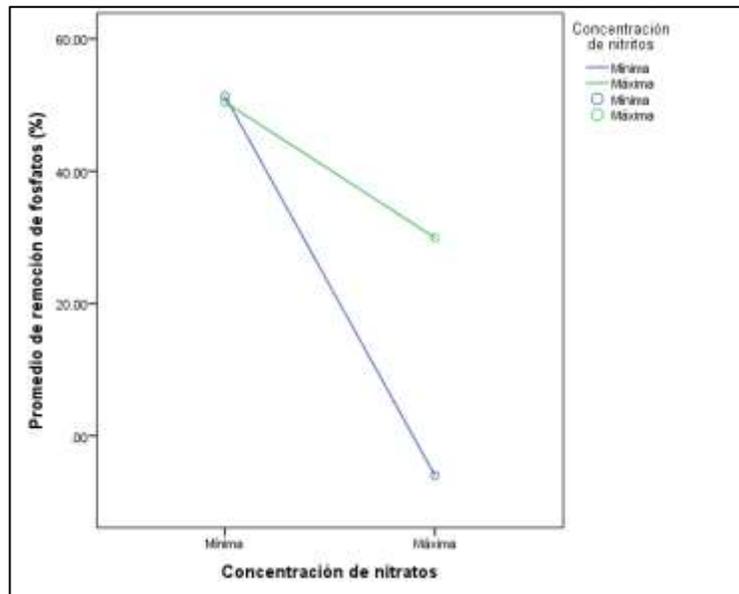
Resúmenes de casos

Remoción de fosfatos (%)

Concentraciones de nitratos	Concentraciones de nitritos	N	Media	Desviación estándar
Mínima	Mínima	12	51,3025	22,04082
	Máxima	12	50,4375	17,54063
	Total	24	50,8700	19,48542
Máxima	Mínima	12	-5,9992	59,14420
	Máxima	12	29,9267	13,22385
	Total	24	11,9638	45,75262
Total	Mínima	24	22,6517	52,55352
	Máxima	24	40,1821	18,45341
	Total	48	31,4169	39,95822

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 15. **Porcentaje de remoción fosfato vs concentraciones de nitratos y nitritos**



Fuente: elaboración propia, empleando SPSS.

Apéndice 16. **Resumen de análisis de remoción de fosfatos con concentración nitratos, fosfatos y concentración de amonio**

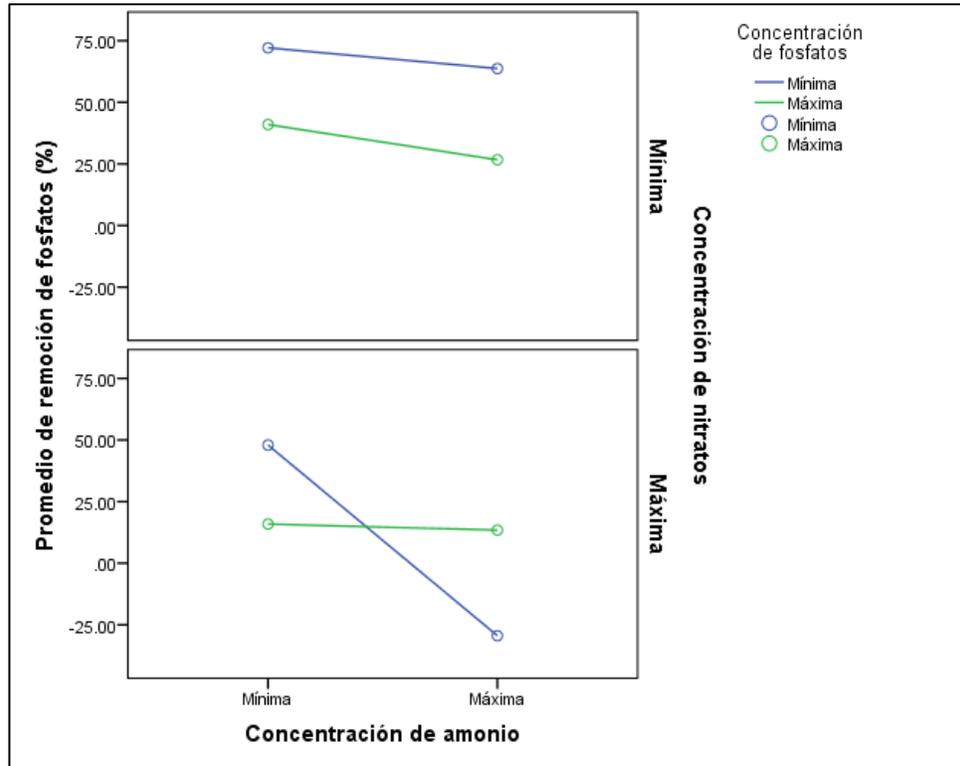
Resúmenes de casos

Remoción de fosfatos (%)

Concentraciones de amonio	Concentraciones de fosfatos	Concentraciones de nitratos	N	Media	Desviación estándar
Mínima	Mínima	Mínima	6	72,1100	10,08538
		Máxima	6	47,9467	16,74723
		Total	12	60,0283	18,24710
	Máxima	Mínima	6	40,9767	8,19165
		Máxima	6	15,8900	11,29417
		Total	12	28,4333	16,12826
	Total	Mínima	12	56,5433	18,46851
		Máxima	12	31,9183	21,58078
		Total	24	44,2308	23,32503
Máxima	Mínima	Mínima	6	63,7050	4,31339
		Máxima	6	-29,4167	74,22248
		Total	12	17,1442	69,83932
	Máxima	Mínima	6	26,6883	,95122
		Máxima	6	13,4350	9,08631
		Total	12	20,0617	9,26519
	Total	Mínima	12	45,1967	19,55935
		Máxima	12	-7,9908	55,15802
		Total	24	18,6029	48,74432
Total	Mínima	Mínima	12	67,9075	8,59986
		Máxima	12	9,2650	65,29826
		Total	24	38,5863	54,51353
	Máxima	Mínima	12	33,8325	9,30547
		Máxima	12	14,6625	9,85660
		Total	24	24,2475	13,55523
	Total	Mínima	24	50,8700	19,48542
		Máxima	24	11,9638	45,75262
		Total	48	31,4169	39,95822

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 17. **Porcentaje de remoción fosfato vs concentraciones de nitratos, amonio y fosfato**



Fuente: elaboración propia, empleando SPSS.

Apéndice 18. **Resumen de análisis de remoción de fosfatos con concentración nitritos, fosfatos y concentración de amonio**

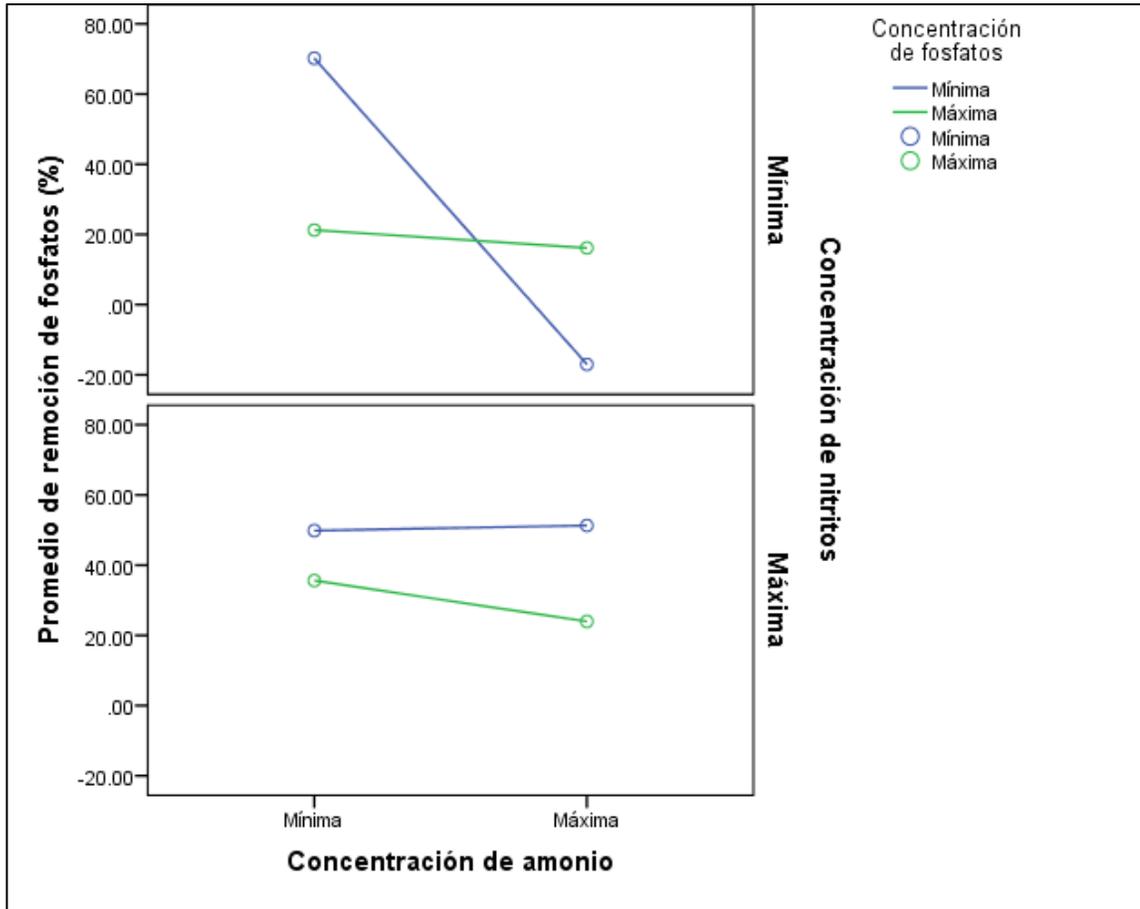
Resúmenes de casos

Remoción de fosfatos (%)

Concentraciones de amonio	Concentraciones de fosfatos	Concentraciones de nitritos	N	Media	Desviación estándar	
Mínima	Mínima	Mínima	6	70,2000	13,55734	
		Máxima	6	49,8567	17,33183	
		Total	12	60,0283	18,24710	
	Máxima	Mínima	6	21,2583	17,04718	
		Máxima	6	35,6083	12,57402	
		Total	12	28,4333	16,12826	
	Total	Mínima	12	45,7292	29,47711	
		Máxima	12	42,7325	16,24118	
		Total	24	44,2308	23,32503	
	Máxima	Mínima	Mínima	6	-17,0017	86,21634
			Máxima	6	51,2900	22,33965
			Total	12	17,1442	69,83932
Máxima		Mínima	6	16,1500	12,00056	
		Máxima	6	23,9733	2,84957	
		Total	12	20,0617	9,26519	
Total		Mínima	12	-,4258	61,18783	
		Máxima	12	37,6317	20,83376	
		Total	24	18,6029	48,74432	
Total		Mínima	Mínima	12	26,5992	74,40533
			Máxima	12	50,5733	19,07742
			Total	24	38,5863	54,51353
	Máxima	Mínima	12	18,7042	14,30634	
		Máxima	12	29,7908	10,60553	
		Total	24	24,2475	13,55523	
	Total	Mínima	24	22,6517	52,55352	
		Máxima	24	40,1821	18,45341	
		Total	48	31,4169	39,95822	

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 19. **Porcentaje de remoción fosfato vs concentraciones de nitritos, amonio y fosfato**



Fuente: elaboración propia, empleando SPSS.

Apéndice 20. **Resumen de análisis de remoción de fosfatos con concentración nitritos, nitratos y concentración de amonio**

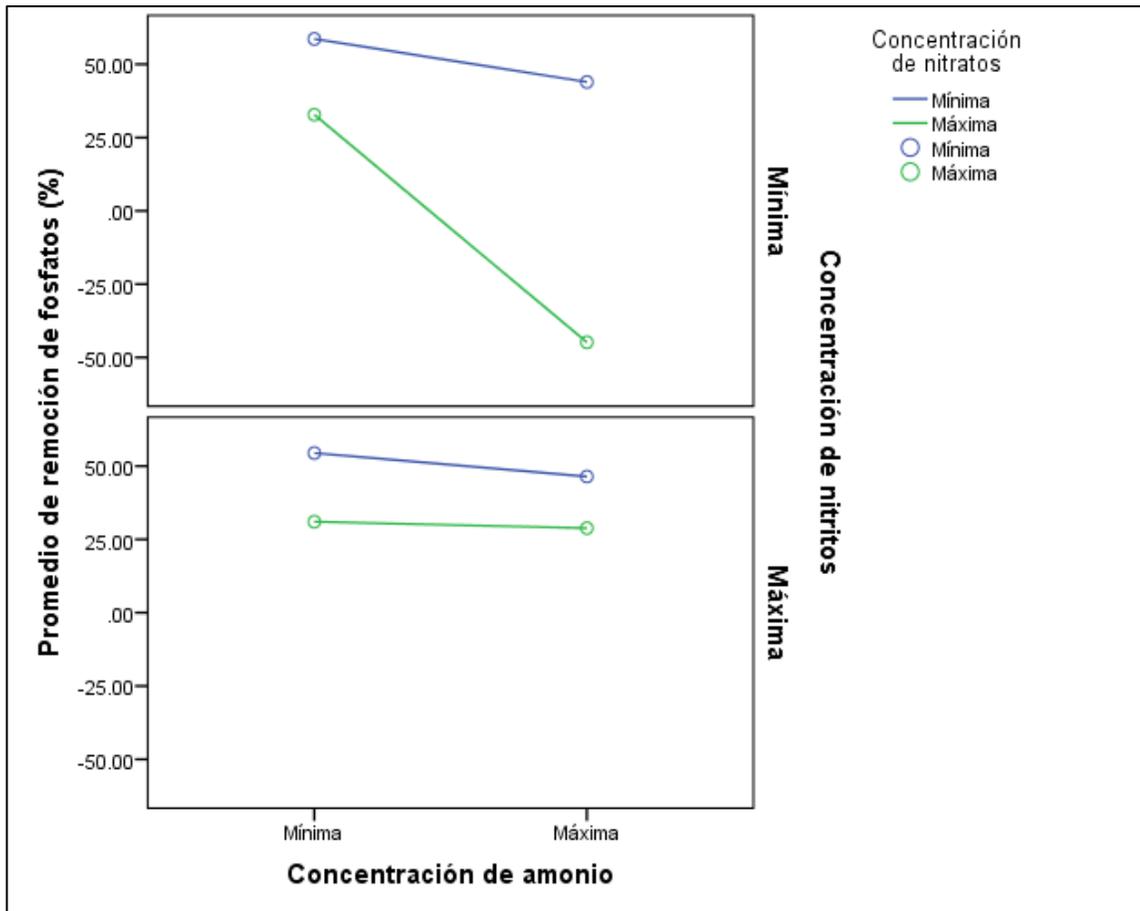
Resúmenes de casos

Remoción de fosfatos (%)

Concentraciones de amonio	Concentraciones de nitratos	Concentraciones de nitritos	N	Media	Desviación estándar	
Mínima	Mínima	Mínima	6	58,6467	24,33549	
		Máxima	6	54,4400	12,14722	
		Total	12	56,5433	18,46851	
	Máxima	Mínima	6	32,8117	30,31329	
		Máxima	6	31,0250	10,18799	
		Total	12	31,9183	21,58078	
	Total	Mínima	12	45,7292	29,47711	
		Máxima	12	42,7325	16,24118	
		Total	24	44,2308	23,32503	
	Máxima	Mínima	Mínima	6	43,9583	18,63036
			Máxima	6	46,4350	22,15580
			Total	12	45,1967	19,55935
Máxima		Mínima	6	-44,8100	56,22909	
		Máxima	6	28,8283	16,67405	
		Total	12	-7,9908	55,15802	
Total		Mínima	12	-,4258	61,18783	
		Máxima	12	37,6317	20,83376	
		Total	24	18,6029	48,74432	
Total		Mínima	Mínima	12	51,3025	22,04082
			Máxima	12	50,4375	17,54063
			Total	24	50,8700	19,48542
	Máxima	Mínima	12	-5,9992	59,14420	
		Máxima	12	29,9267	13,22385	
		Total	24	11,9638	45,75262	
	Total	Mínima	24	22,6517	52,55352	
		Máxima	24	40,1821	18,45341	
		Total	48	31,4169	39,95822	

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 20. **Porcentaje de remoción fosfato vs concentraciones de nitritos, amonio y nitratos**



Fuente: elaboración propia, empleando SPSS.

Apéndice 21. **Resumen de análisis de remoción de fosfatos con concentración nitritos, nitratos y concentración de fosfato**

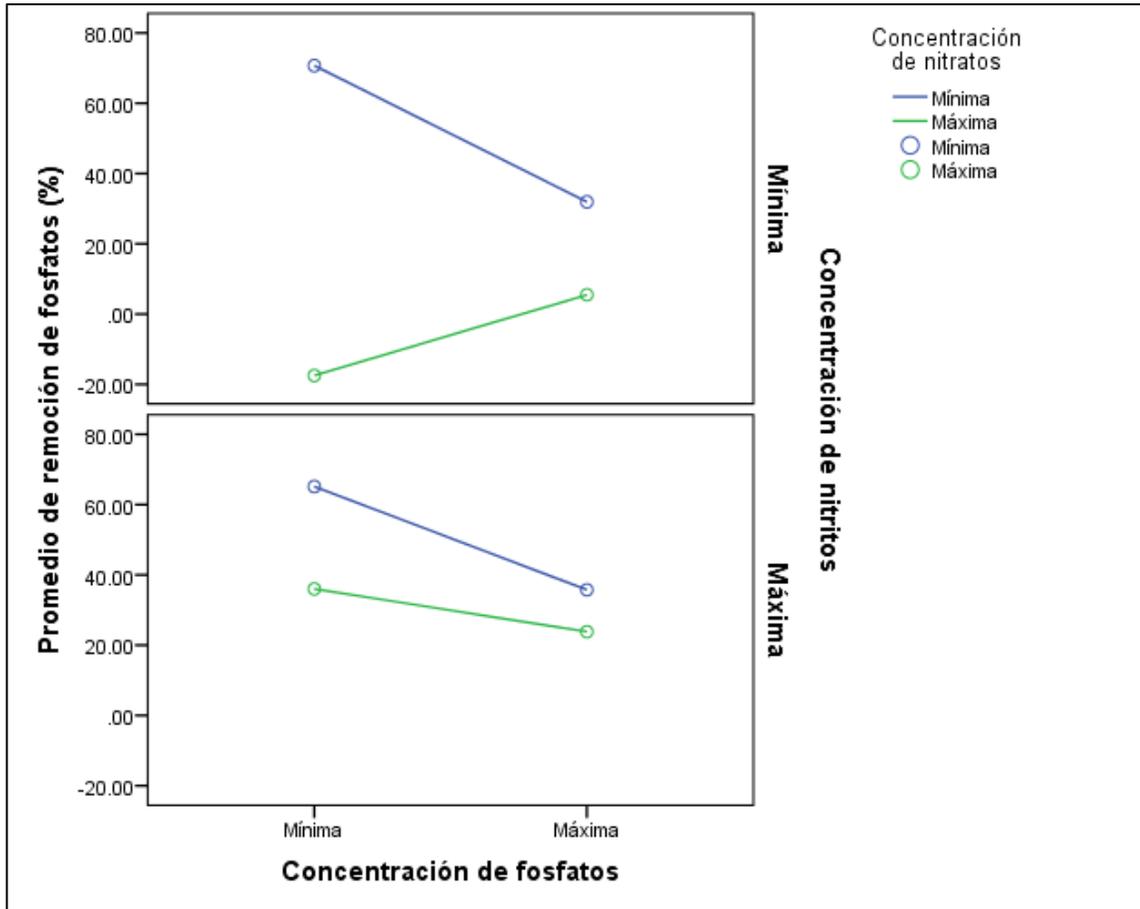
Resúmenes de casos

Remoción de fosfatos (%)

Concentraciones de fosfatos	Concentraciones de nitratos	Concentraciones de nitritos	N	Media	Desviación estándar	
Mínima	Mínima	Mínima	6	70,6783	11,71174	
		Máxima	6	65,1367	2,66753	
		Total	12	67,9075	8,59986	
	Máxima	Mínima	6	-17,4800	85,90249	
		Máxima	6	36,0100	16,86866	
		Total	12	9,2650	65,29826	
	Total	Mínima	12	26,5992	74,40533	
		Máxima	12	50,5733	19,07742	
		Total	24	38,5863	54,51353	
	Máxima	Mínima	Mínima	6	31,9267	5,52945
			Máxima	6	35,7383	12,29673
			Total	12	33,8325	9,30547
Máxima		Mínima	6	5,4817	,31518	
		Máxima	6	23,8433	3,36834	
		Total	12	14,6625	9,85660	
Total		Mínima	12	18,7042	14,30634	
		Máxima	12	29,7908	10,60553	
		Total	24	24,2475	13,55523	
Total		Mínima	Mínima	12	51,3025	22,04082
			Máxima	12	50,4375	17,54063
			Total	24	50,8700	19,48542
	Máxima	Mínima	12	-5,9992	59,14420	
		Máxima	12	29,9267	13,22385	
		Total	24	11,9638	45,75262	
	Total	Mínima	24	22,6517	52,55352	
		Máxima	24	40,1821	18,45341	
		Total	48	31,4169	39,95822	

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 22. **Porcentaje de remoción fosfato vs concentraciones de nitritos, fosfato y nitratos**



Fuente: elaboración propia, empleando SPSS.

Apéndice 23. **Resumen de análisis de remoción de nitrato con concentración amonio y concentración de nitratos**

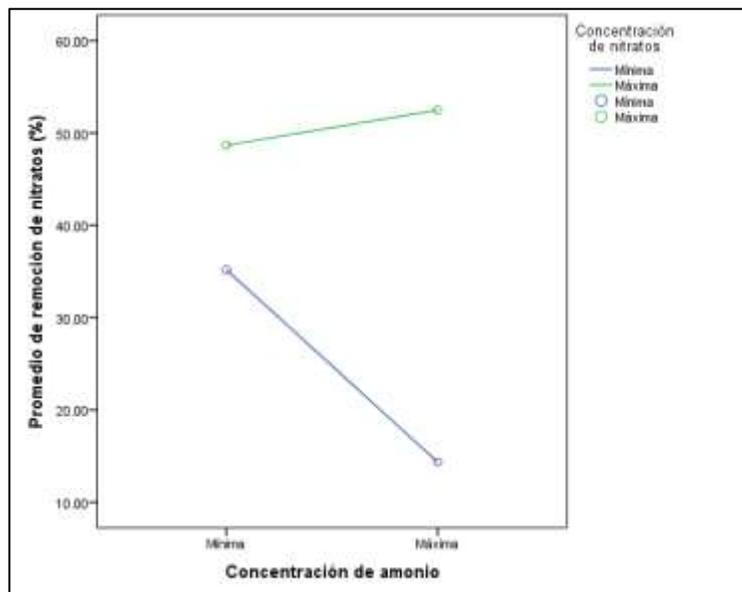
Resúmenes de casos

Remoción de nitratos (%)

Concentraciones de amonio	Concentraciones de nitratos	N	Media	Desviación estándar
Mínima	Mínima	12	35,1858	29,12848
	Máxima	12	48,6617	21,70222
	Total	24	41,9238	26,04644
Máxima	Mínima	12	14,3517	35,02422
	Máxima	12	52,4867	12,85886
	Total	24	33,4192	32,32859
Total	Mínima	24	24,7688	33,25212
	Máxima	24	50,5742	17,55425
	Total	48	37,6715	29,35828

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 24. **Porcentaje de remoción nitratos vs concentraciones de nitrato y amonio**



Fuente: elaboración propia, empleando SPSS.

Apéndice 25. **Resumen de análisis de remoción de nitrato con concentración amonio y concentración de nitritos**

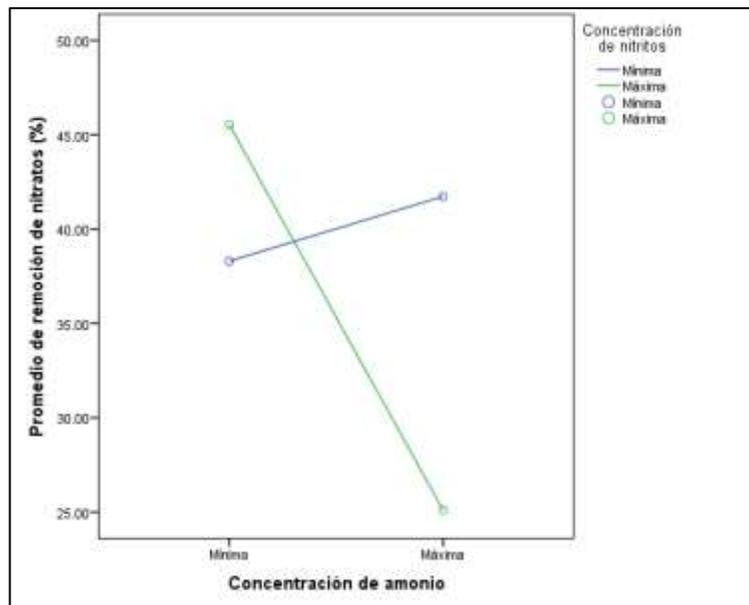
Resúmenes de casos

Remoción de nitratos (%)

Concentraciones de amonio	Concentraciones de nitritos	N	Media	Desviación estándar
Mínima	Mínima	12	38,3042	33,39279
	Máxima	12	45,5433	16,57846
	Total	24	41,9238	26,04644
Máxima	Mínima	12	41,7275	24,63118
	Máxima	12	25,1108	37,78870
	Total	24	33,4192	32,32859
Total	Mínima	24	40,0158	28,74916
	Máxima	24	35,3271	30,38597
	Total	48	37,6715	29,35828

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 26. **Porcentaje de remoción nitratos vs concentraciones de nitritos y amonio**



Fuente: elaboración propia, empleando SPSS.

Apéndice 27. **Resumen de análisis de remoción de nitrato con concentración fosfato y concentración de nitritos**

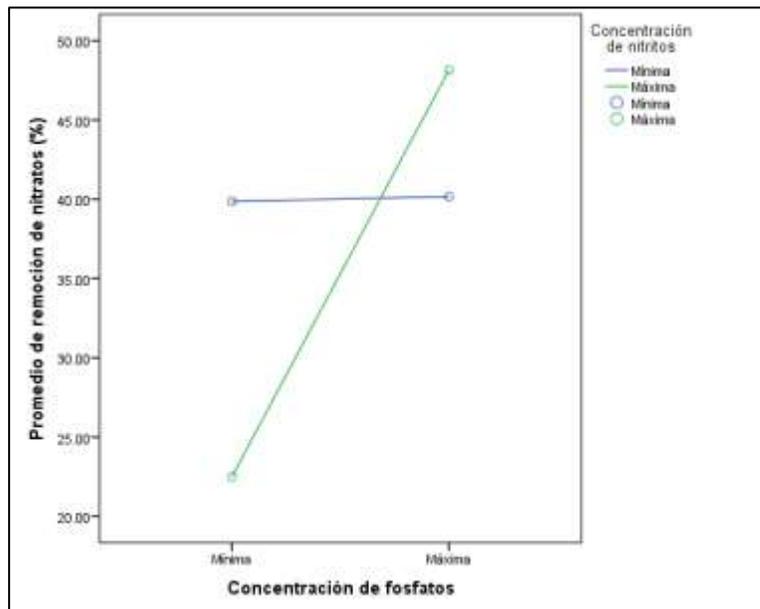
Resúmenes de casos

Remoción de nitratos (%)

Concentraciones de fosfatos	Concentraciones de nitritos	N	Media	Desviación estándar
Mínima	Mínima	12	39,8608	34,99377
	Máxima	12	22,5017	36,54711
	Total	24	31,1813	36,09821
Máxima	Mínima	12	40,1708	22,43990
	Máxima	12	48,1525	15,36133
	Total	24	44,1617	19,24324
Total	Mínima	24	40,0158	28,74916
	Máxima	24	35,3271	30,38597
	Total	48	37,6715	29,35828

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 28. **Porcentaje de remoción nitratos vs concentraciones de nitritos y fosfato**



Fuente: elaboración propia, empleando SPSS.

Apéndice 29. **Resumen de análisis de remoción de nitrato con concentración fosfato, amonio y concentración de nitritos**

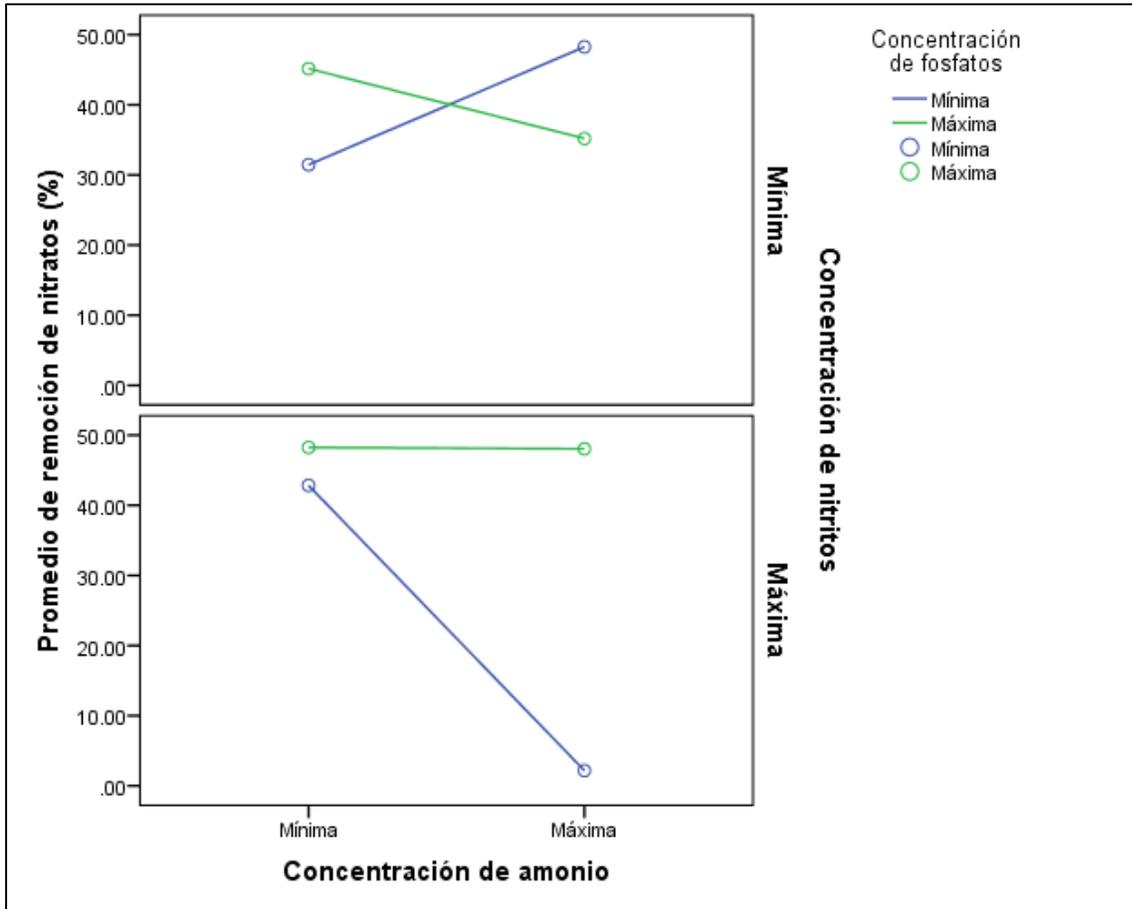
Resúmenes de casos

Remoción de nitratos (%)

Concentraciones de amonio	Concentraciones de fosfatos	Concentraciones de nitritos	N	Media	Desviación estándar	
Mínima	Mínima	Mínima	6	31,4533	41,79087	
		Máxima	6	42,8383	18,89494	
		Total	12	37,1458	31,48785	
	Máxima	Mínima	6	45,1550	24,37322	
		Máxima	6	48,2483	15,16838	
		Total	12	46,7017	19,42205	
	Total	Mínima	12	38,3042	33,39279	
		Máxima	12	45,5433	16,57846	
		Total	24	41,9238	26,04644	
	Máxima	Mínima	Mínima	6	48,2683	27,89118
			Máxima	6	2,1650	39,86113
			Total	12	25,2167	40,68805
Máxima		Mínima	6	35,1867	21,31040	
		Máxima	6	48,0567	17,00097	
		Total	12	41,6217	19,56979	
Total		Mínima	12	41,7275	24,63118	
		Máxima	12	25,1108	37,78870	
		Total	24	33,4192	32,32859	
Total		Mínima	Mínima	12	39,8608	34,99377
			Máxima	12	22,5017	36,54711
			Total	24	31,1813	36,09821
	Máxima	Mínima	12	40,1708	22,43990	
		Máxima	12	48,1525	15,36133	
		Total	24	44,1617	19,24324	
	Total	Mínima	24	40,0158	28,74916	
		Máxima	24	35,3271	30,38597	
		Total	48	37,6715	29,35828	

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 30. **Porcentaje de remoción nitratos vs concentraciones de nitritos,amonio y fosfato**



Fuente: elaboración propia, empleando SPSS.

Apéndice 31. **Resumen de análisis de remoción de nitrito con concentración amonio y concentración de fosfatos**

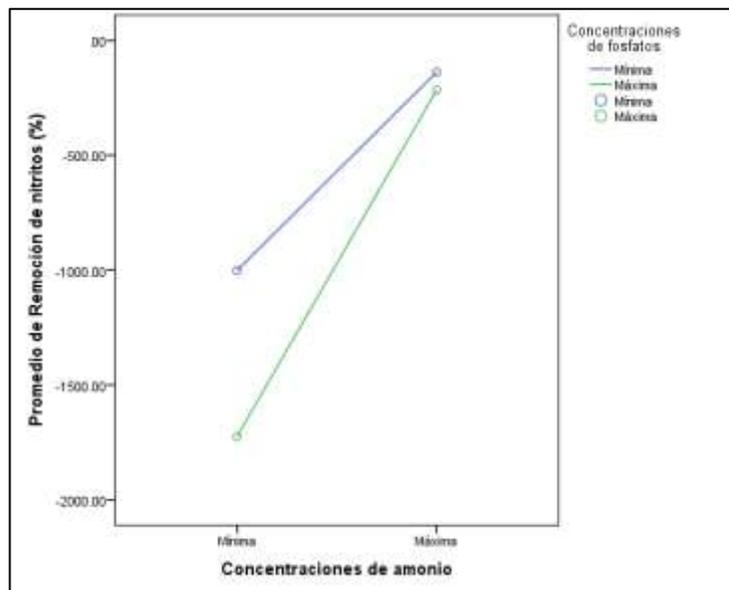
Resúmenes de casos

Remoción de nitritos (%)

Concentraciones de amonio	Concentraciones de fosfatos	N	Media	Desviación estándar
Mínima	Mínima	12	-1 001,7750	1 119,14523
	Máxima	12	-1 725,2500	2 341,96433
	Total	24	-1 363,5125	1 832,68167
Máxima	Mínima	12	-1 373 442	276,44683
	Máxima	12	-215,3250	445,59438
	Total	24	-176,3346	364,82487
Total	Mínima	24	-569,5596	911,31634
	Máxima	24	-970,2875	1 820,13025
	Total	48	-769,9235	1 438,26536

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 32. **Porcentaje de remoción nitritos vs concentraciones de fosfato y amonio**



Fuente: elaboración propia, empleando SPSS.

Apéndice 33. **Resumen de análisis de remoción de nitrito con concentración amonio y concentración de nitratos**

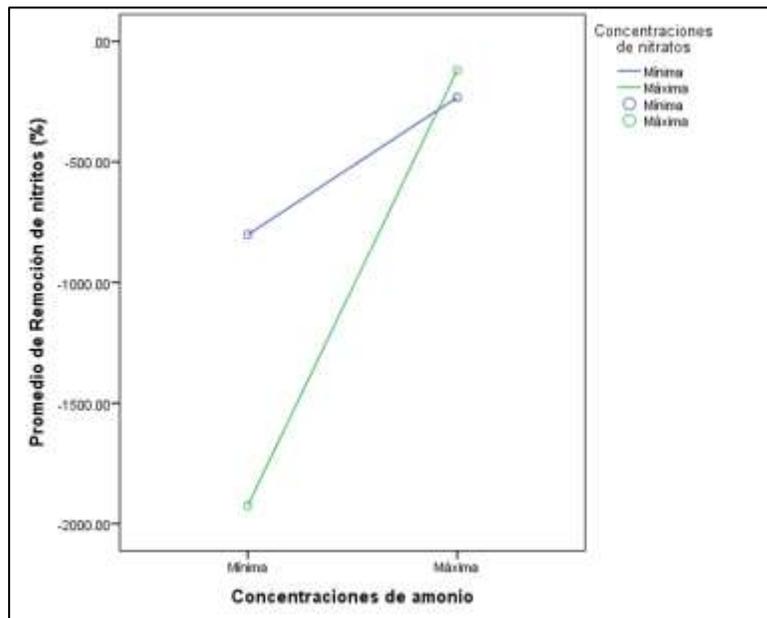
Resúmenes de casos

Remoción de nitritos (%)

Concentraciones de amonio	Concentraciones de nitratos	N	Media	Desviación estándar
Mínima	Mínima	12	-801,9192	902,32025
	Máxima	12	-1 925,1058	2 349,57092
	Total	24	-1 363,5125	1 832,68167
Máxima	Mínima	12	-232,8083	427,34541
	Máxima	12	-119,8608	297,84488
	Total	24	-176,3346	364,82487
Total	Mínima	24	-517,3638	749,14990
	Máxima	24	-1 022,4833	1 879,57677
	Total	48	-769,9235	1 438,26536

Fuente: elaboración propia, programa SPSS.

Apéndice 34. **Porcentaje de remoción nitritos vs concentraciones de nitratos y amonio**



Fuente: elaboración propia, empleando SPSS.

Apéndice 35. **Resumen de análisis de remoción de nitrito con concentración amonio y concentración de nitritos**

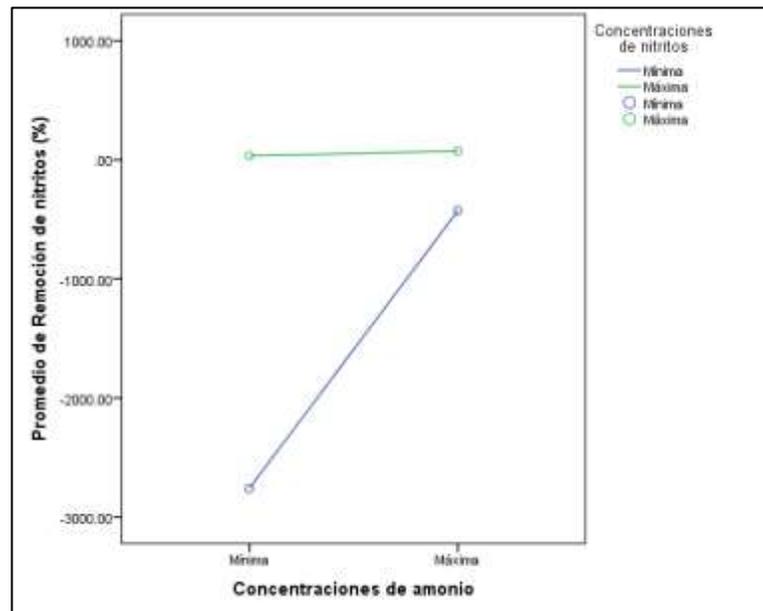
Resúmenes de casos

Remoción de nitritos (%)

Concentraciones de amonio	Concentraciones de nitritos	N	Media	Desviación estándar
Mínima	Mínima	12	-2 759,8700	1 663,72679
	Máxima	12	32,8450	25,60404
	Total	24	-1 363,5125	1 832,68167
Máxima	Mínima	12	-426,5150	376,05766
	Máxima	12	73,8458	17,72651
	Total	24	-176,3346	364,82487
Total	Mínima	24	-1 593,1925	1 676,83373
	Máxima	24	53,3454	30,03922
	Total	48	-769,9235	1 438,26536

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 36. **Porcentaje de remoción nitritos vs concentraciones de nitritos y amonio**



Fuente: elaboración propia, empleando SPSS.

Apéndice 37. **Resumen de análisis de remoción de nitrito con concentración fosfatos y concentración de nitratos**

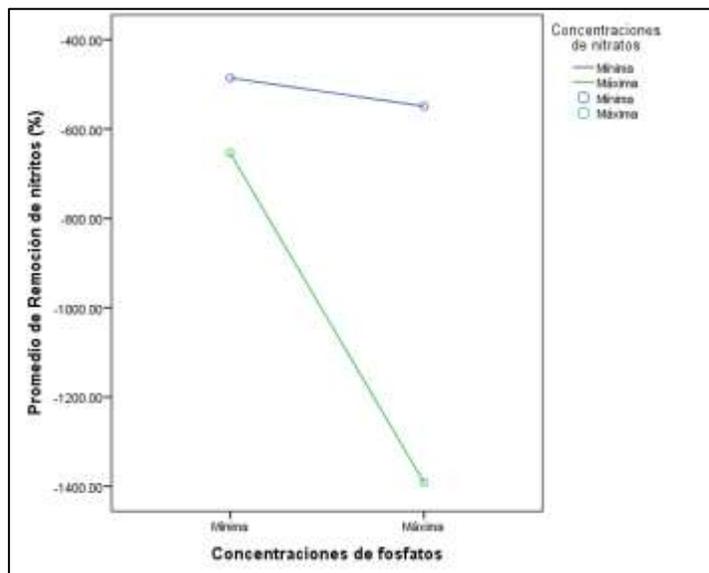
Resúmenes de casos

Remoción de nitritos (%)

Concentraciones de fosfatos	Concentraciones de nitratos	N	Media	Desviación estándar
Mínima	Mínima	12	-485,7650	798,19175
	Máxima	12	-653,3542	1 041,18439
	Total	24	-569,5596	911,31634
Máxima	Mínima	12	-548,9625	730,87830
	Máxima	12	-1 391,6125	2 450,59801
	Total	24	-970,2875	1 820,13025
Total	Mínima	24	-517,3638	749,14990
	Máxima	24	-1 022,4833	1 879,57677
	Total	48	-769,9235	1 438,26536

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 38. **Porcentaje de remoción nitritos vs concentraciones de nitratos y fosfatos**



Fuente: elaboración propia, empleando SPSS.

Apéndice 39. **Resumen de análisis de remoción de nitrato con concentración fosfatos y concentración de nitratos**

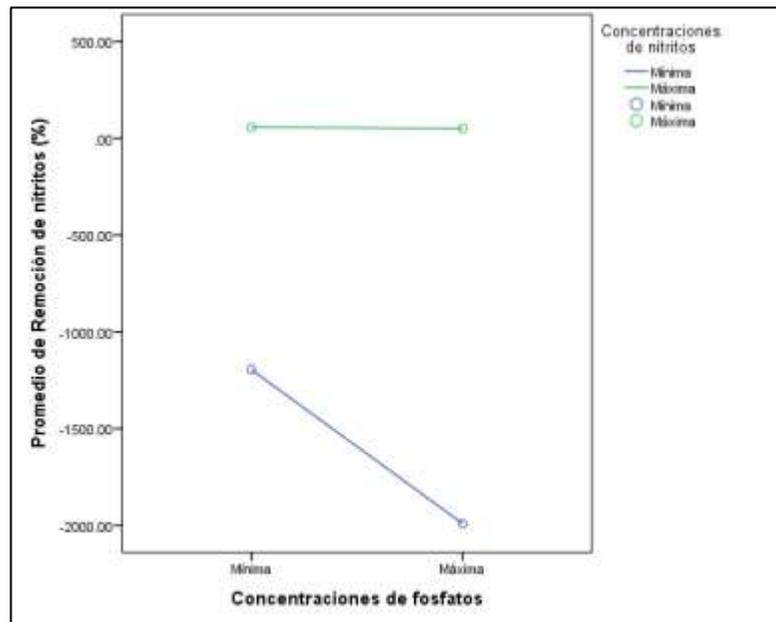
Resúmenes de casos

Remoción de nitratos (%)

Concentraciones de fosfatos	Concentraciones de nitratos	N	Media	Desviación estándar
Mínima	Mínima	12	-1 195,4758	938,49728
	Máxima	12	56,3567	30,72694
	Total	24	-569,5596	911,31634
Máxima	Mínima	12	-1 990,9092	2 157,14263
	Máxima	12	50,3342	30,37784
	Total	24	-970,2875	1 820,13025
Total	Mínima	24	-1 593,1925	1 676,83373
	Máxima	24	53,3454	30,03922
	Total	48	-769,9235	1 438,26536

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 40. **Porcentaje de remoción nitratos vs concentraciones de nitratos y fosfatos**



Fuente: elaboración propia, empleando SPSS.

Apéndice 41. **Resumen de análisis de remoción de nitrato con concentración nitratos y concentración de nitritos**

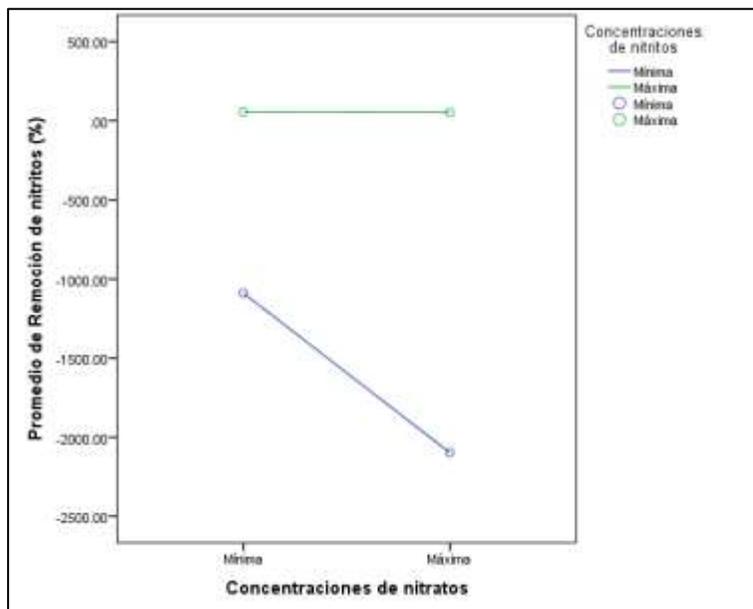
Resúmenes de casos

Remoción de nitritos (%)

Concentraciones de nitratos	Concentraciones de nitritos	N	Media	Desviación estándar
Mínima	Mínima	12	-1 089,3933	677,48761
	Máxima	12	54,6658	23,50227
	Total	24	-517,3638	749,14990
Máxima	Mínima	12	-2 096,9917	2 205,99042
	Máxima	12	52,0250	36,47714
	Total	24	-1 022,4833	1 879,57677
Total	Mínima	24	-1 593,1925	1 676,83373
	Máxima	24	53,3454	30,03922
	Total	48	-769,9235	1 438,26536

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 42. **Porcentaje de remoción nitritos vs concentraciones de nitritos y nitratos**



Fuente: elaboración propia, empleado SPSS.

Apéndice 43. **Resumen de análisis de remoción de nitrito con concentración fosfatos, amonio y concentración de nitratos**

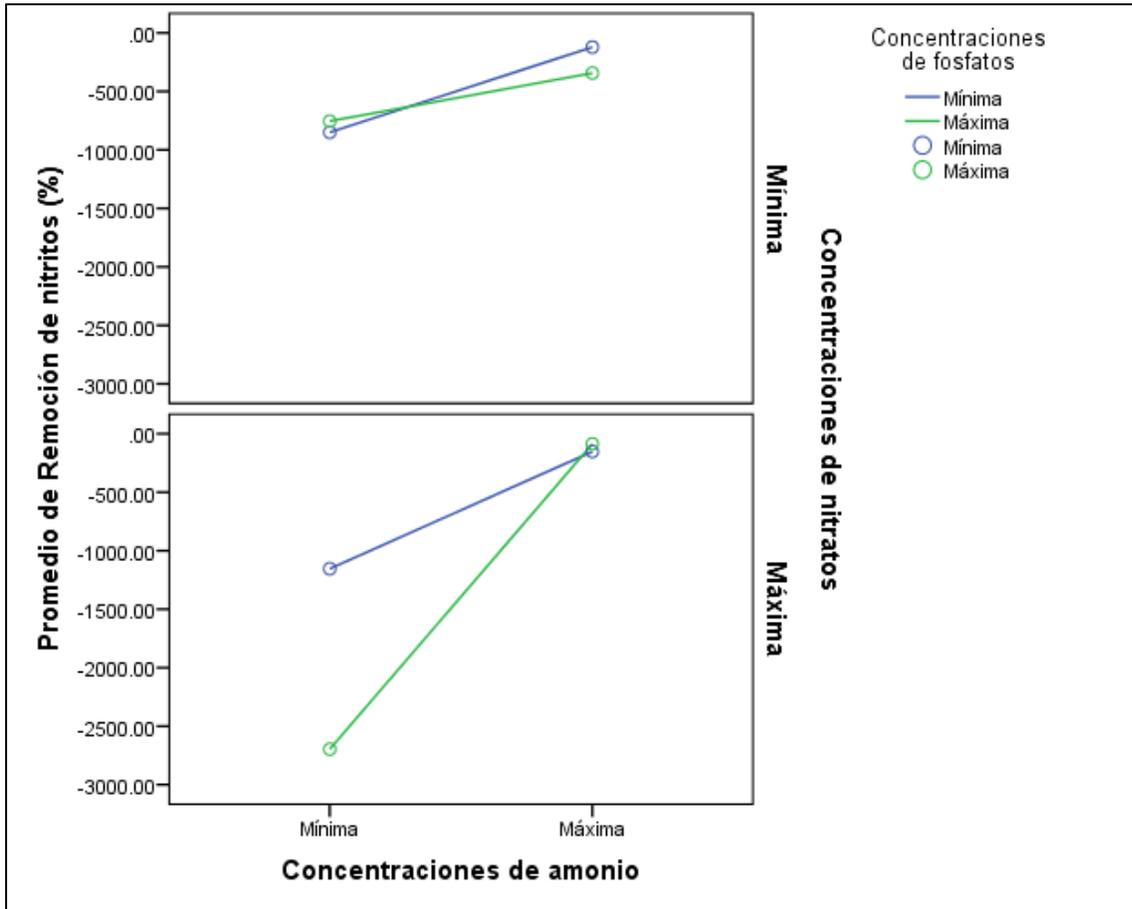
Resúmenes de casos

Remoción de nitritos (%)

Concentraciones de amonio	Concentraciones de fosfatos	Concentraciones de nitratos	N	Media	Desviación estándar
Mínima	Mínima	Mínima	6	-849,5733	1 014,16726
		Máxima	6	-1 153,9767	1 292,80208
		Total	12	-1 001,7750	1 119,14523
	Máxima	Mínima	6	-754,2650	870,18079
		Máxima	6	-2 696,2350	3 007,75499
		Total	12	-1 725,2500	2 341,96433
	Total	Mínima	12	-801,9192	902,32025
		Máxima	12	-1 925,1058	2 349,57092
		Total	24	-1 363,5125	1 832,68167
Máxima	Mínima	Mínima	6	-121,9567	235,48100
		Máxima	6	-152,7317	334,82937
		Total	12	-137,3442	276,44683
	Máxima	Mínima	6	-343,6600	562,87681
		Máxima	6	-86,9900	283,65749
		Total	12	-215,3250	445,59438
	Total	Mínima	12	-232,8083	427,34541
		Máxima	12	-119,8608	297,84488
		Total	24	-176,3346	364,82487
Total	Mínima	Mínima	12	-485,7650	798,19175
		Máxima	12	-653,3542	1 041,18439
		Total	24	-569,5596	911,31634
	Máxima	Mínima	12	-548,9625	730,87830
		Máxima	12	-1 391,6125	2 450,59801
		Total	24	-970,2875	1 820,13025
	Total	Mínima	24	-517,3638	749,14990
		Máxima	24	-1 022,4833	1 879,57677
		Total	48	-769,9235	1 438,26536

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 44. **Porcentaje de remoción nitritos vs concentraciones de fosfatos, amonio y nitratos**



Fuente: elaboración propia, empleando SPSS.

Apéndice 45. **Resumen de análisis de remoción de nitrito con concentración fosfatos, amonio y concentración de nitritos**

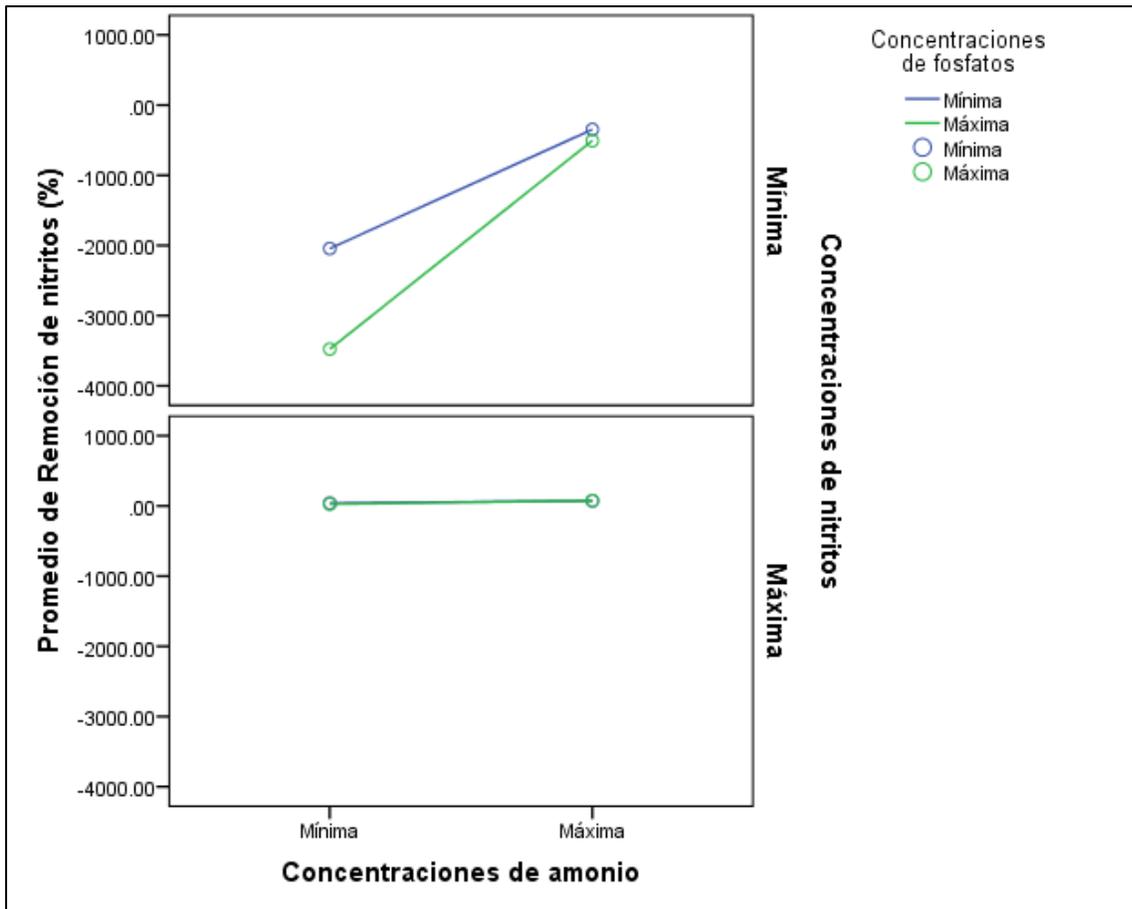
Resúmenes de casos

Remoción de nitritos (%)

Concentraciones de amonio	Concentraciones de fosfatos	Concentraciones de nitritos	N	Media	Desviación estándar
Mínima	Mínima	Mínima	6	-2 043,9833	384,01347
		Máxima	6	40,4333	33,57438
		Total	12	-1 001,7750	1 119,14523
	Máxima	Mínima	6	-3 475,7567	2170,74175
		Máxima	6	25,2567	13,29697
		Total	12	-1 725,2500	2 341,96433
	Total	Mínima	12	-2 759,8700	1663,72679
		Máxima	12	32,8450	25,60404
		Total	24	-1 363,5125	1 832,68167
Máxima	Mínima	Mínima	6	-346,9683	249,65460
		Máxima	6	72,2800	18,47576
		Total	12	-137,3442	276,44683
	Máxima	Mínima	6	-506,0617	483,33090
		Máxima	6	75,4117	18,54900
		Total	12	-215,3250	445,59438
	Total	Mínima	12	-426,5150	376,05766
		Máxima	12	73,8458	17,72651
		Total	24	-176,3346	364,82487
Total	Mínima	Mínima	12	-1 195,4758	938,49728
		Máxima	12	56,3567	30,72694
		Total	24	-569,5596	911,31634
	Máxima	Mínima	12	-1 990,9092	2 157,14263
		Máxima	12	50,3342	30,37784
		Total	24	-970,2875	1 820,13025
	Total	Mínima	24	-1 593,1925	1 676,83373
		Máxima	24	53,3454	30,03922
		Total	48	-769,9235	1 438,26536

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 46. **Porcentaje de remoción nitritos vs concentraciones de fosfatos, amonio y nitritos**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 47. **Resumen de análisis de remoción de nitrito con concentración nitratos, amonio y concentración de nitritos**

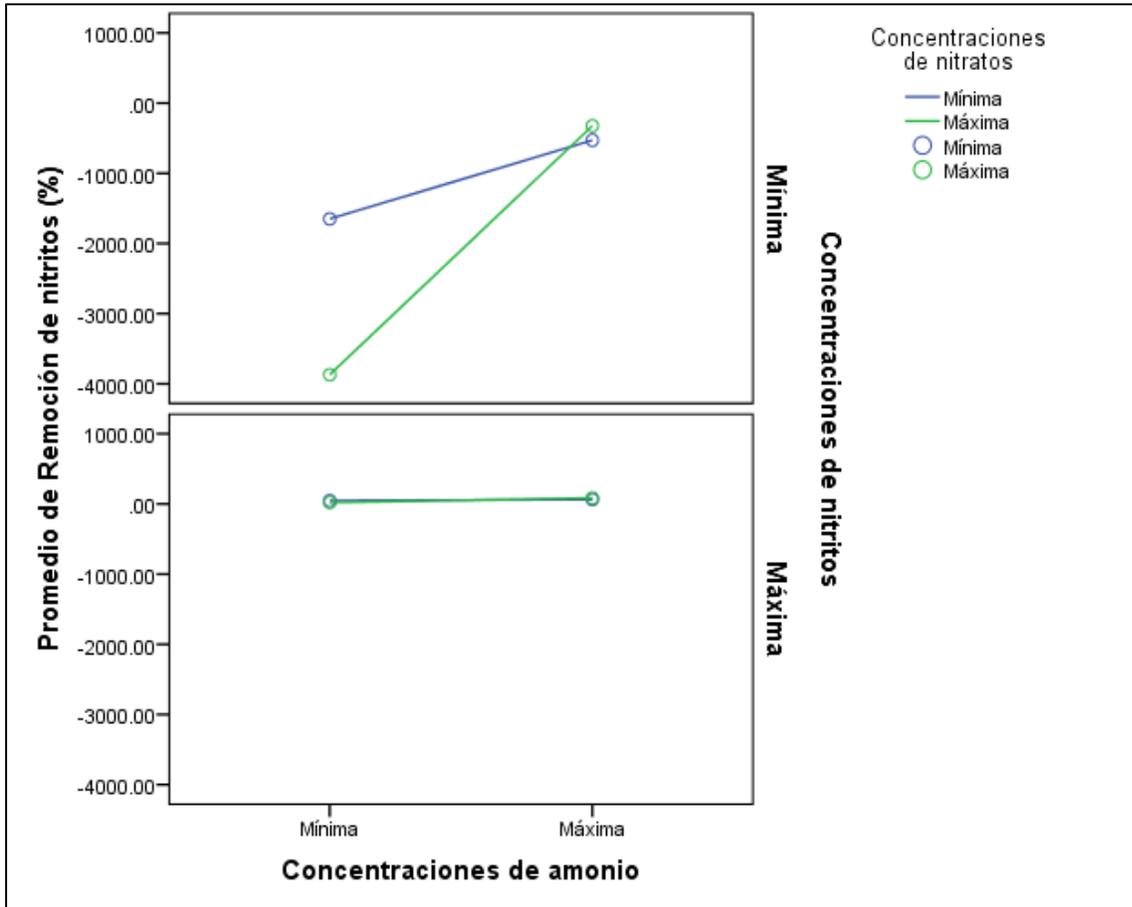
Resúmenes de casos

Remoción de nitritos (%)

Concentraciones de amonio	Concentraciones de nitratos	Concentraciones de nitritos	Media	Desviación estándar
Mínima	Mínima	Mínima	-1 649,9983	253,48603
		Máxima	46,1600	27,80347
		Total	-801,9192	902,32025
	Máxima	Mínima	-3 869,7417	1 751,84462
		Máxima	19,5300	15,61153
		Total	-1 925,1058	2 349,57092
	Total	Mínima	-27598700	1 663,72679
		Máxima	32,8450	25,60404
		Total	-1 363,5125	1832,68167
Máxima	Mínima	Mínima	-528,7883	437,32657
		Máxima	63,1717	16,38637
		Total	-232,8083	427,34541
	Máxima	Mínima	-324,2417	307,83837
		Máxima	84,5200	1222047
		Total	-119,8608	297.,84488
	Total	Mínima	-426,5150	376,05766
		Máxima	73,8458	17,72651
		Total	-176,3346	364,82487
Total	Mínima	Mínima	-1 089,3933	677,48761
		Máxima	54,6658	23,50227
		Total	-517,3638	749,14990
	Máxima	Mínima	-2 096,9917	2 205,99042
		Máxima	52,0250	36,47714
		Total	-1 022,4833	1 879,57677
	Total	Mínima	-1 593,1925	1 676,83373
		Máxima	53,3454	30,03922
		Total	-769,9235	1 438,26536

Fuente: elaboración propia, programa SPSS.

Apéndice 48. **Porcentaje de remoción nitritos vs concentraciones de nitratos, amonio y nitritos**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 49. **Resumen de análisis de remoción de nitrito con concentración nitratos, fosfatos y concentración de nitritos**

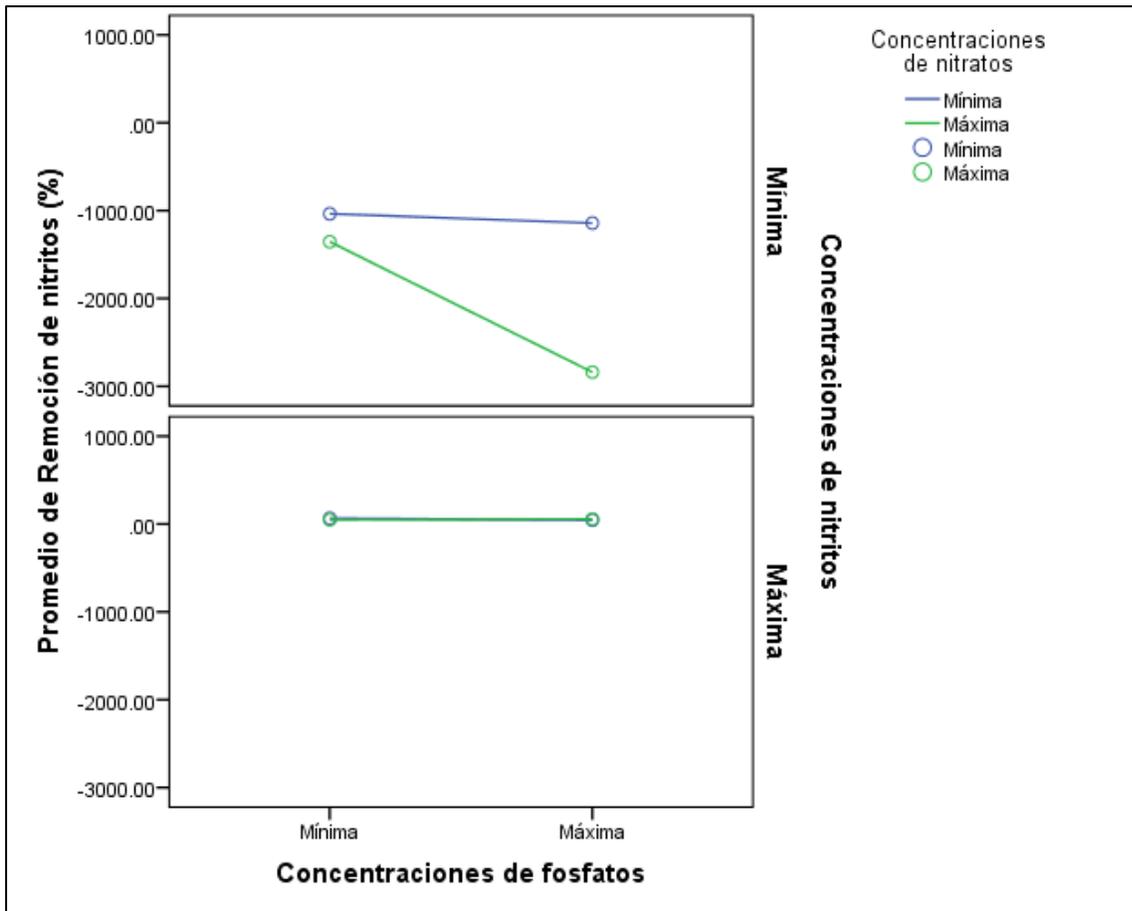
Resúmenes de casos

Remoción de nitritos (%)

Concentraciones de fosfatos	Concentraciones de nitratos	Concentraciones de nitritos	N	Media	Desviación estándar
Mínima	Mínima	Mínima	6	-1 036,3617	820,70220
		Máxima	6	64,8317	22,67129
		Total	12	-485,7650	798,19175
	Máxima	Mínima	6	-1 354,5900	1 096,99410
		Máxima	6	47,8817	37,29276
		Total	12	-653,3542	1 041,18439
	Total	Mínima	12	-1 195,4758	938,49728
		Máxima	12	56,3567	30,72694
		Total	24	-569,5596	911,31634
Máxima	Mínima	Mínima	6	-1 142,4250	573,99917
		Máxima	6	44,5000	21,28781
		Total	12	-548,9625	730,87830
	Máxima	Mínima	6	-2 839,3933	2 860,04993
		Máxima	6	56,1683	38,66948
		Total	12	-1 391,6125	2 450,59801
	Total	Mínima	12	-1 990,9092	2 157,14263
		Máxima	12	50,3342	30,37784
		Total	24	-970,2875	1 820,13025
Total	Mínima	Mínima	12	-1 089,3933	677,48761
		Máxima	12	54,6658	23,50227
		Total	24	-517,3638	749,14990
	Máxima	Mínima	12	-2 096,9917	2 205,99042
		Máxima	12	52,0250	36,47714
		Total	24	-1 022,4833	1 879,57677
	Total	Mínima	24	-1 593,1925	1 676,83373
		Máxima	24	53,3454	30,03922
		Total	48	-769,9235	1 438,26536

Fuente: elaboración propia, programa SPSS.

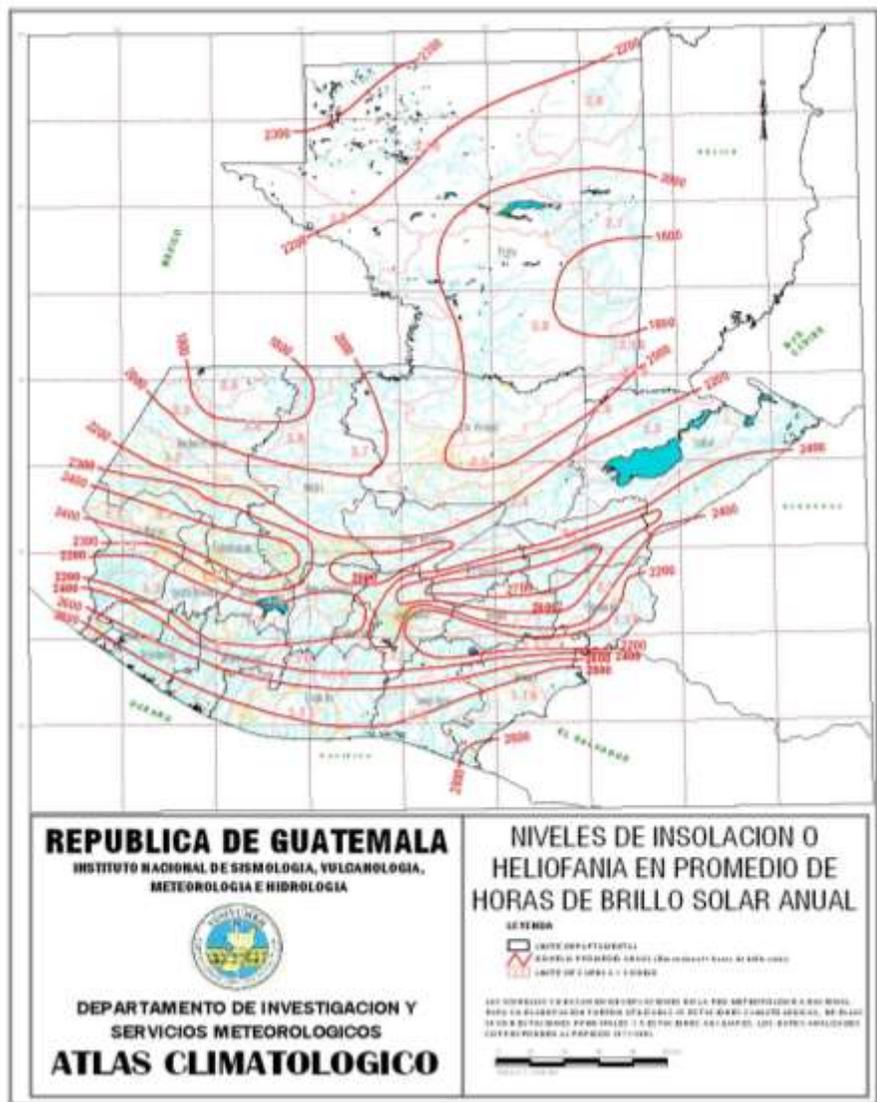
Apéndice 50. **Porcentaje de remoción nitritos vs concentraciones de nitratos, fosfatos y nitritos**



Fuente: elaboración propia, programa SPSS.

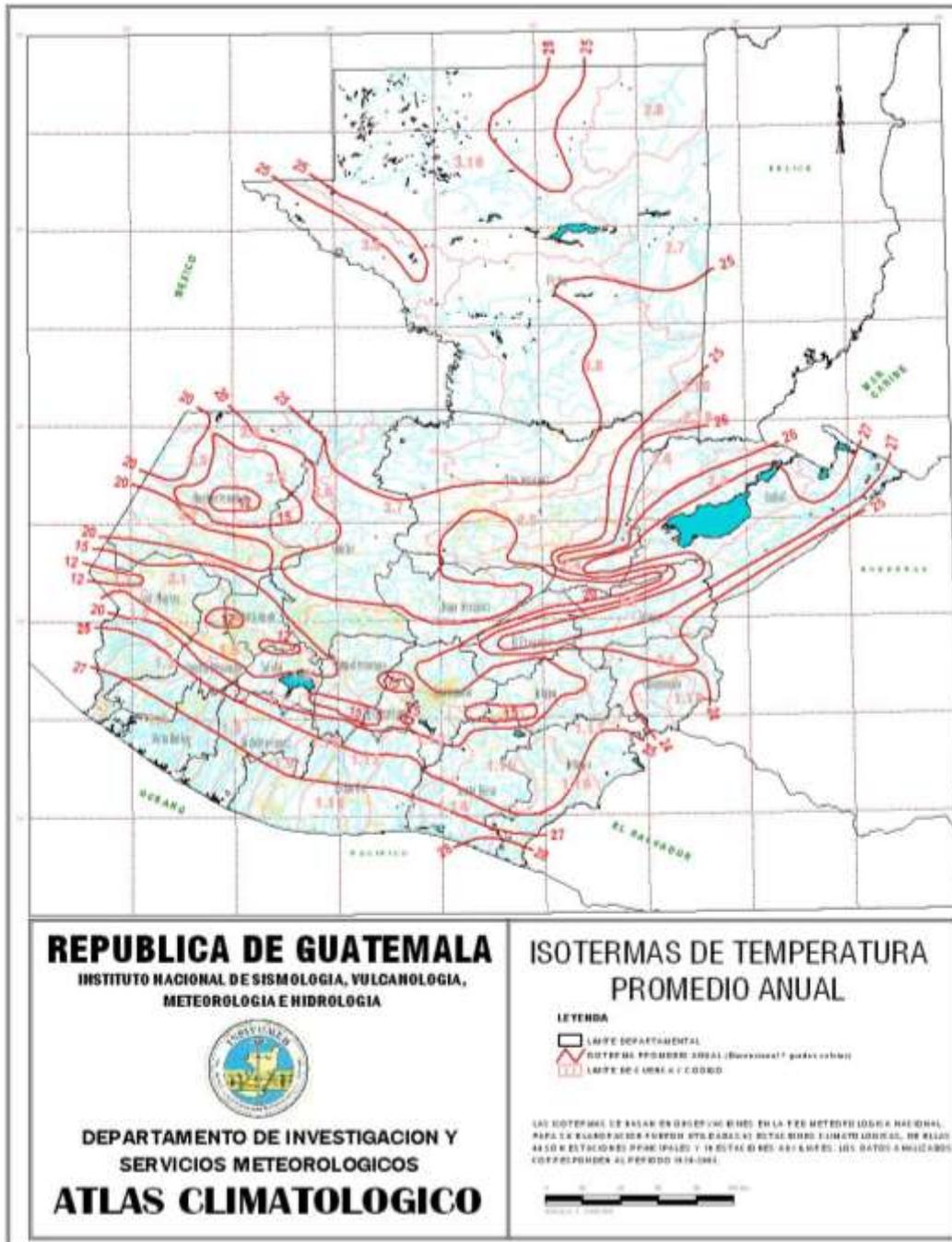
ANEXOS

Anexo 1. Niveles de insolación anual en Guatemala



Fuente: departamento de investigación y servicios meteorológicos.

Anexo 2. Temperatura promedio anual en Guatemala



Fuente: departamento de investigación y servicios meteorológicos.