

EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE REMOCIÓN DE DBO, DQO, NITRÓGENO TOTAL, FÓSFORO TOTAL, COLIFORMES TOTALES Y FECALES PARA UN SISTEMA DE HUMEDALES ARTIFICIALES, CON LA ESPECIE (*Chrysopogon zizanioides*) EN UNA VIVIENDA RURAL DEL MUNICIPIO DE FLORIDABLANCA

ANDRÉS FELIPE POVEDA SALAZAR

MARIA PAULA ZARATE HERRERA

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
BUCARAMANGA
2019**

EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE REMOCIÓN DE DBO, DQO, NITRÓGENO TOTAL, FÓSFORO TOTAL, COLIFORMES TOTALES Y FECALES PARA UN SISTEMA DE HUMEDALES ARTIFICIALES, CON LA ESPECIE (*Chrysopogon zizanioides*) EN UNA VIVIENDA RURAL DEL MUNICIPIO DE FLORIDABLANCA

ANDRÉS FELIPE POVEDA SALAZAR

MARIA PAULA ZARATE HERRERA

**Proyecto de grado para optar por el título de
INGENIERO AMBIENTAL.**

DIRECTORA

Dra. Sandra Natalia Correa Torres

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
BUCARAMANGA
2019**

Nota de aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Floridablanca, 15 de Julio de 2019

AGRADECIMIENTOS

A Dios por permitirnos abordar y culminar satisfactoriamente este proyecto que con su voluntad divina nos ayudó a derrumbar todos los obstáculos presentados a lo largo de esta etapa.

A nuestras familias por la formación personal que hacen de nosotros unas mejores personas, por el apoyo económico contante durante la etapa universitaria, porque gracias a ellos culminamos una meta más en nuestras vidas y sin ellos nuestros sueños no serían realidad.

A nuestra directora de proyecto la profesora Sandra Natalia Correa por brindarnos la confianza de llevar a cabo este proyecto y porque siempre creyó en nuestras capacidades como futuros profesionales.

A todos los profesores asociados al proyecto, la profesora Claudia Santoyo Muñoz, la profesora Martha Cecilia Duran, el profesor Thomas Florville y el profesor Alexander Reatiga por aportar sus conocimientos en su respectiva área para contribuir de forma completa en la ejecución del proyecto de grado.

TABLA DE CONTENIDO

| | |
|--|----|
| INTRODUCCIÓN | 15 |
| 1. OBJETIVOS | 16 |
| 1.1 Objetivo general..... | 16 |
| 1.2 Objetivos Específicos..... | 16 |
| 2. MARCO TEÓRICO | 17 |
| 2.1 Humedales Artificiales..... | 17 |
| 2.2 Fitorremediación | 17 |
| 2.2.1 Vetiver (<i>Chrysopogon zizanioides</i>) | 18 |
| 2.2.2 Sistemas de tratamiento de aguas residuales a través de humedales artificiales con la especie (<i>Chrysopogon zizanioides</i>)..... | 20 |
| 2.3 Características químicas y biológicas del agua residual | 20 |
| 2.4 Cinética de remoción | 22 |
| 2.4.1 Velocidad de remoción | 22 |
| 2.4.2 Orden de la reacción | 23 |
| 2.5 Modelo matemático para Humedales Artificiales | 25 |
| 2.6 Análisis estadístico..... | 26 |
| 3 METODOLOGÍA | 27 |
| 3.1 Localización de humedales y muestreo | 29 |
| 3.2 FASE I: Análisis estadístico de las variables de DBO, DQO, nitrógeno, fosforo, coliformes totales y fecales para un sistema de humedales artificiales. | 31 |
| 3.2.1 Muestreo de agua residual tratada en los humedales | 33 |
| 3.2.2 Recolección de muestras | 33 |
| 3.2.3 Evaluación de la eficiencia de remoción de los parámetros químicos y biológicos en los humedales artificiales tipo Batch | 34 |
| 3.2.4 Análisis mediante técnicas de diseños de experimentos de las variables DBO5, DQO con la presencia de la especie <i>Chrysopogon zizanioides</i> | 35 |
| 3.3 FASE II. Establecimiento de la cinética de remoción de los parámetros químicos analizados en los humedales artificiales. | 38 |
| 3.3.1 Definición de la magnitud del coeficiente de velocidad de reacción | 38 |
| 3.3.2 Determinación del orden de la reacción por cada parámetro analizado | 38 |
| 3.4 FASE III: Determinación del ajuste de los resultados experimentales a los modelos matemáticos para el tratamiento de aguas residuales en zona tropical. | 39 |
| 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 40 |

| | | |
|-----------|--|----|
| 4.1 | FASE I: Análisis estadístico de las variables DBO, DQO, nitrógeno, fósforo, coliformes totales y fecales para un sistema de humedales artificiales. | 40 |
| 4.1.1 | Análisis mediante técnicas de diseños de experimentos para las variables DBO y DQO para un sistema de humedales artificiales. | 40 |
| HUMEDAL 1 | | 40 |
| 4.1.2 | Análisis mediante técnicas de diseño de experimentos | 40 |
| A. | Variable: DQO | 40 |
| B. | Variable: DBO | 44 |
| HUMEDAL 2 | | 48 |
| 4.1.3 | Análisis mediante técnicas de diseño de experimentos | 48 |
| A. | Variable: DQO | 48 |
| B. | Variable: DBO | 52 |
| HUMEDAL 3 | | 55 |
| 4.1.4 | Análisis mediante técnicas de diseño de experimentos | 55 |
| A. | Variable: DQO | 55 |
| B. | Variable: DBO | 59 |
| 4.1.5 | Análisis del modelo DBCA para las variables DQO y DBO en los humedales artificiales tipo batch con presencia de la especie <i>Chrysopogon zizanioides</i> | 63 |
| A. | VARIABLE: DQO | 63 |
| B. | VARIABLE: DBO | 65 |
| 4.1.6 | Análisis de porcentaje de remoción en los humedales artificiales | 68 |
| A. | DQO EN LA REMOCION DE HUMEDALES | 68 |
| B. | DBO EN LA REMOCION DE HUMEDALES | 69 |
| 4.1.7 | Análisis de porcentaje de remoción de nitrógeno total, fósforo total, coliformes totales y fecales en los humedales artificiales tipo batch con la presencia de la especie <i>Chrysopogon zizanioides</i> | 71 |
| A. | Nitrógeno | 71 |
| B. | Fósforo | 74 |
| C. | Coliformes totales | 77 |
| D. | Coliformes fecales | 79 |
| 4.2 | FASE II: Establecimiento la cinética de remoción de los parámetros químicos analizados, para el sistema de humedales artificiales, en una vivienda rural en el municipio de Floridablanca. | 82 |
| 4.3 | FASE III: Determinar el ajuste de los resultados experimentales a los modelos matemáticos de ecuaciones de regresión, establecidos al funcionamiento tipo batch en humedales artificiales, para el tratamiento de aguas residuales en zona tropical..... | 87 |
| 5. | CONCLUSIONES..... | 93 |

| | |
|-------------------------|-----|
| 6. RECOMENDACIONES..... | 95 |
| BIBLIOGRAFÍA | 97 |
| ANEXO A | 101 |
| ANEXOS B..... | 105 |

LISTA DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Ventajas y desventajas del proceso de fitorremediación..... | 18 |
| Tabla 2. Características Generales del pasto Vetiver (<i>Chrysopogon zizanioides</i>). | 19 |
| Tabla 3. Modelos matemáticos de regresión lineal, para determinar valores de DBO, Nitrógeno y fósforo..... | 25 |
| Tabla 4. Métodos para la evaluación de los parámetros fisicoquímicos y biológicos en los humedales..... | 32 |
| Tabla 5. Parámetros en los humedales artificiales para aguas residuales domésticas. | 32 |
| Tabla 6. Ciclos, puntos de muestreo, días y variables para cada humedal con la especie (<i>Chrysopogon zizanioides</i>)..... | 34 |
| Tabla 7. Ciclos, puntos de muestreo, días y variables para cada humedal sin la presencia de la especie (<i>Chrysopogon zizanioides</i>)..... | 34 |
| Tabla 8. Hipótesis planteadas para las pruebas estadísticas entre los humedales. | 37 |
| Tabla 9. Modelos matemáticos de regresión lineal, para determinar valores de DBO, Nitrógeno y fósforo totales. | 39 |
| Tabla 10. Modelo DCA humedal 1- DQO..... | 40 |
| Tabla 11. Modelo DCA humedal 1-DBO. | 45 |
| Tabla 12. Modelo DCA humedal 2-DQO..... | 48 |
| Tabla 13. Modelo DCA humedal 2-DBO. | 52 |
| Tabla 14. Modelo DCA humedal 3-DQO..... | 56 |
| Tabla 15. Modelo DCA humedal 3-DBO. | 60 |
| Tabla 16. Modelo DBCA variable DQO..... | 64 |
| Tabla 17. Modelo DBCA variable DBO. | 66 |
| Tabla 18. Porcentaje de remoción de DQO sin la especie <i>Chrysopogon zizanioides</i> con su respectivo ciclo..... | 69 |
| Tabla 19. Porcentaje de remoción de DBO sin la especie <i>Chrysopogon zizanioides</i> con su respectivo ciclo..... | 70 |
| Tabla 20. Porcentaje de remoción de Nitrógeno total con la especie <i>Chrysopogon zizanioides</i> | 73 |

| | |
|---|----|
| Tabla 21. Porcentaje de remoción de Nitrógeno sin la especie Chryzopogon zizanioides. | 73 |
| Tabla 22. Porcentaje de remoción de Fósforo total con presencia de la especie Chryzopogon zizanioides. | 76 |
| Tabla 23. Porcentaje de remoción de Fósforo sin presencia de la especie Chryzopogon zizanioides. | 76 |
| Tabla 24. Porcentaje de remoción de Coliformes con la presencia de la especie Chryzopogon zizanioides. | 78 |
| Tabla 25. Porcentaje de remoción de Coliformes totales sin la presencia de la especie Chryzopogon zizanioides. | 79 |
| Tabla 26. Porcentaje de remoción de E. coli con la presencia de la especie Chryzopogon zizanioides. | 81 |
| Tabla 27. Porcentaje de remoción de E. coli sin la presencia de la especie Chryzopogon zizanioides. | 81 |
| Tabla 28. Datos de concentración experimentales del humedal 1 para cada ciclo evaluado en los puntos de muestreo de la variable DQO. | 83 |
| Tabla 29. Valores de k para las variables DQO, DBO, nitrógeno y fósforo del humedal 1. | 86 |
| Tabla 30. Valores de k para las variables DQO, DBO, nitrógeno y fósforo del humedal 2. | 86 |
| Tabla 31. Valores de k para las variables DQO, DBO, nitrógeno y fósforo del humedal 3. | 86 |
| Tabla 32. Datos de concentración de la entrada para la variable DBO. | 87 |
| Tabla 33. Datos de concentración de la salida para la variable DBO de los humedales artificiales tipo batch con el humedal promedio. | 88 |
| Tabla 34. Datos para la variable DBO de los humedales artificiales tipo batch. | 88 |
| Tabla 35. Modelos de regresión lineal para la variable DBO. | 89 |
| Tabla 36. Errores cuadráticos, errores promedios y errores relativos porcentuales de la variable DBO. | 89 |
| Tabla 37. Modelos de regresión lineal para la variable nitrógeno. | 90 |
| Tabla 38. Errores cuadráticos, errores promedios y errores relativos porcentuales de la variable nitrógeno. | 91 |

| | |
|---|----|
| Tabla 39. Modelos de regresión lineal para la variable Fósforo. | 91 |
| Tabla 40. Errores cuadráticos, errores promedios y errores relativos porcentuales de la variable Fósforo..... | 92 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|--------------------------------------|
| Figura 1. Comportamiento de una reacción con cinética de primer orden. | 24 |
| Figura 2. Comportamiento de una reacción con cinética de segundo orden..... | 24 |
| Figura 3. Esquema de metodología. | ¡Error! Marcador no definido. |
| Figura 4. Dimensionamiento del sistema del humedal artificial 1 con la especie (<i>Chrysopogon zizanioides</i>)..... | 29 |
| Figura 5. Dimensionamiento del sistema de humedal artificial 2 con la especie (<i>Chrysopogon zizanioides</i>)..... | 30 |
| Figura 6. Dimensionamiento del sistema de humedal artificial 3 con la especie (<i>Chrysopogon zizanioides</i>)..... | 31 |
| Figura 7. Tratamiento, variables respuesta, los factores controlables y no controlables con la unidad experimental en el proceso de investigación | 36 |

LISTA DE GRÁFICAS

| | |
|---|----|
| Gráfica 1. Interacción de los residuos vs pronóstico de la variable DQO en los humedales artificiales con presencia de la especie <i>Chryzopogon zizanioides</i> | 63 |
| Gráfica 2. Interacción de los residuos vs el valor pronosticado de la variable DBO para los humedales artificiales con la especie <i>Chryzopogon zizanioides</i> | 66 |
| Gráfica 3. Porcentaje de remoción de DQO sin la especie <i>Chryzopogon zizanioides</i> con su respectivo ciclo. | 68 |
| Gráfica 4. Porcentaje de remoción de DBO sin la especie <i>Chryzopogon zizanioides</i> con su respectivo ciclo. | 70 |
| Gráfica 5. Porcentajes de remoción de nitrógeno total. A (con presencia de la especie <i>Chryzopogon zizanioides</i>) y B (sin presencia de la especie <i>Chryzopogon zizanioides</i>) 71 | |
| Gráfica 6. Porcentajes de remoción de fósforo total. A (con presencia de la especie <i>Chryzopogon zizanioides</i>) y B (sin presencia de la especie <i>Chryzopogon zizanioides</i>). | 75 |
| Gráfica 7. Porcentajes de remoción de coliformes totales. A (con presencia de la especie <i>Chryzopogon zizanioides</i>) y B (sin presencia de la especie <i>Chryzopogon zizanioides</i>). | 77 |
| Gráfica 8. Porcentajes de remoción de coliformes fecales. A (con presencia de la especie <i>Chryzopogon zizanioides</i>) y B (sin presencia de la especie <i>Chryzopogon zizanioides</i>). 80 | |
| Gráfica 9. Regresión lineal para los valores de DQO, DBO, Nitrógeno y fósforo totales en el humedal 1. | 83 |
| Gráfica 10. Regresión lineal para los valores de DQO, DBO, Nitrógeno y fósforo totales en el humedal 2. | 84 |
| Gráfica 11. Regresión lineal para los valores de DQO, DBO, Nitrógeno y fósforo totales en el humedal 3. | 85 |

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE REMOCIÓN DE DBO, DQO, NITROGENO TOTAL, FOSFORO TOTAL, COLIFORMES TOTALES Y FECALES PARA UN SISTEMA DE HUMEDALES ARTIFICIALES, CON LA ESPECIE (*Chrysopogon zizanioides*) EN UNA VIVIENDA RURAL DEL MUNICIPIO DE FLORIDABLANCA

AUTOR(ES): ANDRÉS FELIPE POVEDA SALAZAR
MARÍA PAULA ZÁRATE HERRERA

PROGRAMA: Facultad de Ingeniería Ambiental

DIRECTOR(A): SANDRA NATALIA CORREA TORRES

RESUMEN

En este estudio se propone evaluar la capacidad de remoción de tres humedales artificiales tipo batch con la especie (*Chrysopogon zizanioides*) ubicados en una vivienda de la zona rural de Floridablanca –Santander, con el fin de realizar un análisis de la remoción de materia orgánica según los parámetros químicos (DBO, DQO, nitrógeno y fósforo totales) y microbiológicos (Coliformes totales y fecales). Se llevaron a cabo tres fases a lo largo del proyecto para la obtención de resultados. La primera fase se basó en un análisis estadístico mediante modelos de diseños de experimentos DCA, DBCA y un análisis descriptivo con los porcentajes de remoción de las variables analizadas en los humedales artificiales, donde el humedal artificial más eficiente para la remoción de las variables químicas y microbiológicas con presencia de la especie *Chrysopogon zizanioides* fue el humedal 2 excepto para la variable nitrógeno total que fue el humedal 1 y para las muestras blanco el humedal 3 fue el más eficiente en todas las variables. En la segunda fase del proyecto se estableció la cinética de remoción para las variables químicas analizadas, donde las constantes cinéticas que se obtuvieron están alejadas de la unidad, siendo poco significativas, por lo tanto se requiere de más datos durante cada ciclo evaluado para obtener una cinética de remoción más significativa para estudios futuros y por último en la fase 3 se determinó el ajuste de los datos experimentales a los modelos de regresión lineal para humedales artificiales en zonas templadas, donde se ajustaron los datos a un modelo de regresión lineal diferente a pesar que las condiciones ambientales donde se analizaron inicialmente son diferentes a las del lugar de estudio.

PALABRAS CLAVE:

DBO, DQO, nitrógeno, fósforo, coliformes totales, E.Coli, cinética, modelos matemáticos

V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

TITLE: EVALUATION OF THE CAPACITY OF REMOVAL OF BOD, COD, TOTAL NITROGEN, TOTAL PHOSPHORUS, TOTAL AND FECAL COLIFORMS FOR A SYSTEM OF ARTIFICIAL WETLANDS, WITH THE SPECIES (*Chrysopogon zizanioides*) IN A RURAL HOUSING OF THE MUNICIPALITY OF FLORIDABLANCA

AUTHOR(S): ANDRÉS FELIPE POVEDA SALAZAR
MARÍA PAULA ZÁRATE HERRERA

FACULTY: Facultad de Ingeniería Ambiental

DIRECTOR: SANDRA NATALIA CORREA TORRES

ABSTRACT

In this study, it is proposed to evaluate the removal capacity of three artificial batch wetlands with the species (*Chrysopogon zizanioides*) located in a house in the rural area of Floridablanca - Santander, in order to perform an analysis of the removal of organic matter according to the chemical parameters (BOD, COD, nitrogen and total phosphorus) and microbiological parameters (total and fecal coliforms). Three phases were carried out throughout the project to obtain results. The first phase was based on a statistical analysis using DCA design models, DBCA and a descriptive analysis with the percentages of removal of the variables analyzed in the artificial wetlands, where the most efficient artificial wetland for the removal of chemical and microbiological variables with the presence of the species *Chrysopogon zizanioides* was wetland 2 except for the variable total nitrogen that was wetland 1 and for white samples wetland 3 was the more efficient in all the variables. In the second phase of the project the kinetics of removal was established for the chemical variables analyzed, where the kinetic constants that were obtained are far from the unit, being insignificant, therefore more data is required during each cycle evaluated to obtain a more significant removal kinetics for future studies and finally in phase 3 the adjustment of the experimental data to the linear regression models for artificial wetlands in temperate zones was determined, where the data were adjusted to a different linear regression model in spite of that the environmental conditions where they were analyzed initially are different from those of the place of study.

KEYWORDS:

BOD, COD, nitrogen, phosphorus, total coliforms, E.Coli, kinetics, mathematical models.

V° B° DIRECTOR OF GRADUATE WORK

INTRODUCCIÓN

Uno de los problemas de contaminación, es la contaminación hídrica, que hoy en día avanza por la falta de inversión económica por parte del estado para el tratamiento de las aguas residuales domesticas generadas por la población de la zona rural, causando impactos ambientales a nivel del suelo y a los cuerpos hídricos cercanos, por el alto contenido de contaminantes que las componen. Esta situación ha conllevado a aumentar la propagación de vectores y malos olores provenientes de las descargas puntuales e incontroladas de dichas viviendas y por consiguiente la afectación de la salud por la transmisión de enfermedades en la población rural.

La construcción de humedales artificiales para el tratamiento de las aguas residuales domesticas cada día se aborda más por el aporte ambiental que generan a la sociedad, los cuales sirven para el control de la contaminación a través de procesos de fitorremediación con especies como el *Chryzopogon zizanioides* que es capaz de remover nutrientes (nitrógeno y fósforo) que son asimilados e incorporados en el tejido vegetal para su crecimiento. (1)

Para el desarrollo de este proyecto se evaluó la capacidad de remoción de DBO, DQO, nitrógeno total, Fósforo total, Coliformes totales y fecales en un sistema de humedales artificiales tipo batch con presencia de la especie *Chryzopogon zizanioides* , donde se analizó estadísticamente los datos experimentales de las variables analizadas , para determinar el humedal más eficiente en remover materia orgánica y organismos patógenos en las aguas residuales provenientes de una vivienda rural, de igual forma se estableció las constantes cinéticas de remoción para las variables químicas evaluadas y por ultimo un ajuste de los resultados experimentales a modelos de regresión ampliamente aceptados por la comunidad científica para zonas templadas.

1. OBJETIVOS

1.1 Objetivo general.

- Evaluar la capacidad de remoción de DBO, DQO, nitrógeno total, fósforo total, Coliformes totales y fecales, para un sistema de humedales artificiales con la especie (*Chrysopogon zizanioides*), en una vivienda rural ubicada en el municipio de Floridablanca.

1.2 Objetivos Específicos

- Analizar estadísticamente las variables DBO, DQO, nitrógeno total, fósforo total, Coliformes totales y fecales para un sistema de humedales artificiales.
- Establecer la cinética de remoción de los parámetros químicos analizados, para el sistema de humedales artificiales, en una vivienda rural en el municipio de Floridablanca.
- Determinar el ajuste de los resultados experimentales a los modelos matemáticos para el tratamiento de aguas residuales en zona tropical.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Humedales Artificiales

Los humedales artificiales son medios de transformación entre el suelo y el agua, se interrelacionan entre sí, cumpliendo la función de ecosistema, dando lugar a procesos fisicoquímicos y biológicos gracias al aporte de nutrientes que son los principales constituyentes del agua residual, gracias a esta capacidad se facilita el tratamiento de las aguas residuales de empresas y municipios. Esta biotecnología cumple la función de filtro natural, no requiere de energía para llevar a cabo su proceso, de igual forma no necesita mantenimiento, siendo más eficiente económicamente en comparación con un sistema de tratamiento convencional. Los humedales artificiales actúan gracias a organismos acuáticos, como especies diferentes de plantas *Typha latifolia*, *Chryzopogon zizanioides*, *Eichhornia crassipes* (2).

Además de cumplir la función de tratar las aguas residuales domiciliarias, sirven para tratar los lixiviados en un relleno sanitario, generados por la descomposición inorgánica de los microorganismos, fuente de contaminación propia de los residuos sólidos urbanos, esta alternativa compensa el impacto ambiental a los recursos naturales, teniendo un gran aporte de valor ambiental.

El humedal con espejo de agua es un pantano o ciénaga donde las plantas emergentes están a una profundidad de 10 a 45 cm, se caracterizan por contener material impermeable con el fin de evitar percolación, también para la retención completa del flujo de entrada y evapotranspiración, la vegetación constituyente actúa como medio de adhesión para los microorganismos propios del ecosistema, disminuyendo la generación de algas y aportando oxígeno al sistema. Los humedales con espejo de agua facilitan remociones altas de DBO, SST, nitrógeno, metales y patógenos, el proceso de remoción es directamente proporcional con el tiempo de retención y la temperatura, se pueden obtener remociones de DBO del 60% al 80% y de SST del 50% al 90%. (3)

Dentro del sistema de humedales se llevan a cabo los procesos fundamentales como la retención y sedimentación de la materia en suspensión, remoción de la materia orgánica, la transformación y asimilación de nutrientes y la inhibición de microorganismos patógenos, gracias a la adaptación de los microorganismos en el sedimento del humedal se llevan a cabo procesos del ciclo del nitrógeno (nitrificación y desnitrificación) y fósforo, además ocurre la adsorción a las arcillas y la precipitación (4).

2.2 Fitorremediación

La fitorremediación es la capacidad que tienen algunas plantas para absorber, acumular, metabolizar, volatilizar o estabilizar ciertas sustancias químicas que afectan el suelo, aire, agua o sedimentos como: metales pesados, metales radioactivos, compuestos orgánicos

y compuestos derivados del petróleo. La fitorremediación es una biotecnología sostenible y económicamente viable para la recuperación de ecosistemas contaminados. (5).

Tabla 1. Ventajas y desventajas del proceso de fitorremediación.

| VENTAJAS | DESVENTAJAS |
|---|--|
| Se puede aplicar in situ y ex situ. | En especies como los árboles o arbustos, los efectos de la fitorremediación se ven a largo plazo |
| Es efectiva sin tener que llevar la muestra contaminada al laboratorio. | Se limita a zonas superficiales contaminadas en la rizósfera de la planta. |
| Es una tecnología sostenible con el medio ambiente. | El crecimiento de las plantas depende las concentraciones de los contaminantes de la zona afectada, solo actúa en concentraciones bajas. |
| Es eficiente tanto para contaminantes orgánicos como inorgánicos. | En el proceso de fitovolatilización, los contaminantes pueden ser emitidos nuevamente a la atmosfera, una vez son captados por las hojas de las plantas. |
| Es viable económicamente. | Los contaminantes acumulados en madera, al ser liberados al ambiente por proceso de combustión, generan impacto ambiental en el aire. |
| No requiere personal técnico para ser aplicado. | No todas las plantas se adaptan a niveles de contaminación. |
| No requiere gasto energético. | Por la solubilidad de algunas sustancias, se puede generar mayor contaminación por el arrastre a nivel del suelo y el agua. |
| Solo necesita de técnicas agronómicas convencionales | Se recomienda ser aplicada en zonas extensas. |
| Es poco desfavorable para los recursos naturales | En sistemas acuáticos se pueden adaptar vectores de enfermedades de origen hídrico. |
| A nivel del suelo mejora las propiedades fisicoquímicas, gracias a la adaptación de especies vegetales. | |
| Es agradable por la sociedad. | |
| Se mitigan impactos ambientales por perforación del suelo. | |
| Se puede aplicar a nivel del agua, suelo, aire y sedimentos | |

Fuente: Tomado de DELGADILLO, Angélica. "Fitorremediación: una alternativa para eliminar la contaminación" (5).


2.2.1 Vetiver (*Chrysopogon zizanioides*)

En este proyecto se empleará la especie (*Chrysopogon zizanioides*) cuyo nombre común es pasto Vetiver, el cual posee excelentes características biológicas para la reducción de la contaminación de las aguas residuales por su capacidad de absorber y tolerar altos niveles de minerales pesados (Organización Mundial para la Salud, 2007). La especie Vetiver es un pasto que capta los minerales pesados como fuente de energía para su metabolismo, favoreciendo el crecimiento de sus raíces y hojas. Adicionalmente este tipo de pasto es usado para la reducción de la erosión y conservación de humedad en el

suelo. La planta Vetiver es capaz de capturar grandes volúmenes de carbono atmosférico, así como su amplia capacidad para desarrollarse a cualquier tipo de suelo, sin importar la fertilidad, el pH o salinidad del sitio, se adapta a climas de temperaturas que van entre los 9 a 45°C, también es de fácil adaptación en zonas de precipitación media anual entre 20 a 600 msnm y en alturas entre 0 a 3600 msnm.

El pasto vetiver (*Chrysopogon zizanioides*) ha demostrado ser la ideal para la conservación del suelo y agua, la humedad del suelo y otros usos como en biorremediación, bioingeniería, forrajes, agroforestería, medicina, artesanía, energía (6). En la **Tabla 2**, se presentan las características generales del pasto Vetiver.

Tabla 2. Características Generales del pasto Vetiver (*Chrysopogon zizanioides*).

| | |
|--|---|
| <p>NOMBRE COMUN: Pasto Vetiver</p>  | |
| CARACTERISTICAS GENERALES | |
| Nombre científico | <i>Chrysopogon zizanioides</i> |
| Forma | <ul style="list-style-type: none"> • Carece de estolones, ni rizomas funcionales. • Sus raíces son finas y compactas, su crecimiento es rápido y alcanzan entre 10 y 12 pies de profundidad en el primer año. Esa característica en sus raíces hace tolerante temperaturas extremas de calor. • Sus tallos son firmes y rígidos que toleran altos niveles de inundación. |
| Temperatura | El pasto Vetiver tolera temperaturas extremas como sequía prolongada, inundaciones entre -15°C a +55°C. |
| Humedad | <ul style="list-style-type: none"> • Es usado en zonas áridas (300 msnm), pero mejor de 700 msnm. • Resiste sequias extremas, pero la condición optima es en temporada de lluvia. |
| Altitud | El pasto Vetiver está limitado por temperaturas bajas en altitudes más altas y con nubosidad. Desde el nivel del mar hasta 2800 msnm. |
| Ambiente acuático | <ul style="list-style-type: none"> • Es eficiente en la absorción de nutrientes como N, P y metales en aguas residuales. • El pasto Vetiver se adapta en zonas con niveles altos de acidez, alcalinidad, salinidad, sodicidad y magnesio. |

Fuente: Tomado de VERTICOL, Blog Vetiver (7), (8)

2.2.2 Sistemas de tratamiento de aguas residuales a través de humedales artificiales con la especie (*Chrysopogon zizanioides*)

Al pasto vetiver se le ha atribuido como una planta que puede remover diversas sustancias contaminantes de las aguas, entre ellos algunos macronutrientes tales como el nitrógeno, fósforo y algunos metales pesados: Níquel, cadmio, plomo, mercurio; y actualmente el flúor que es un halógeno, el cual se analizó en raíces y área foliar del vetiver para descontaminar las aguas que poseen este elemento (Yazmin et al, 2006).

El uso de *Chrysopogon zizanioides* para tratar aguas residuales en humedales artificiales, es una tecnología de bajo costo y eficiente para disminuir la concentración de contaminantes en aguas domésticas e industriales; en estudios ya realizados se ha comprobado que el Vetiver bajo condiciones hidropónicas tiene la capacidad de disminuir el nitrógeno total de 100 mg/L a 6 mg/L con un 94 % de eficiencia ; el fósforo total de 10 mg/L a 1 mg/L con un 90% de eficiencia, Coliformes fecales ≥ 1600 org/100 ml a org/100 mL con un 44% de eficiencia; E.Coli de ≥ 1.600 org/100 mL a 140 org/100 mL con una eficiencia de 91 %, oxígeno disuelto de < 1 mg/L de 1 a 8 mg/Conductividad eléctrica de 928 μ Scm de 1 a 468 μ Scm; pH 7.3 a 6.0 y con facilidad de evapotranspirar 1,1L/día/cuatro plantas/tambor, todo esto con un tiempo de retención de cuatro días (Truong et al, 2000).

De igual forma, se ha comprobado el potencial del pasto Vetiver, por su capacidad de generar hasta 132 t/ha/año de materia seca, biomasa, teniendo mejores resultados que cualquier gramínea, de igual forma puede generar hasta 1.920 kg/ha/año de nitrógeno y 198 kg/ha/año de fósforo, tiene la ventaja de crecer con carencias de nitrógeno hasta de 6.000 kg/ha/año de nitrógeno combinado, todas las características anteriormente mencionadas hacen que el vetiver (*Chrysopogon zizanioides*) sea muy efectiva en descontaminar las aguas residuales (9).

2.3 Características químicas y biológicas del agua residual

Las características químicas por analizar para el agua residual tratada con la especie (*Chrysopogon zizanioides*) son: DBO, DQO, nitrógeno y fósforo totales que dependen de las sustancias orgánicas e inorgánicas que componen el humedal artificial. En cuanto a características biológicas se pretende analizar son las bacterias del grupo Coliformes, que corresponden a los microorganismos patógenos presentes.

➤ Demanda Bioquímica de oxígeno (DBO)

La demanda bioquímica de Oxígeno es la cantidad de oxígeno que necesitan los microorganismos para oxidar (estabilizar) la materia orgánica biodegradable en condiciones aerobias. A escala de laboratorio, esta demanda se cuantifica a 20 °C, con incubación de cinco días, con valores numéricos expresados en mg/L de O₂, es el parámetro más usado para determinar la calidad de las aguas residuales y superficiales, para conocer la cantidad de oxígeno necesario de estabilizar biológicamente la materia orgánica del agua, además sirve para diseñar unidades de tratamiento biológico,

evaluando la eficiencia de los procesos de tratamiento y fijar las cargas orgánicas permisibles de fuentes receptoras (Romero, J; 2013).

➤ Demanda química de oxígeno (DQO)

La demanda química de Oxígeno se usa para cuantificar el oxígeno equivalente a la materia orgánica oxidable químicamente por medio de un agente químico (oxidante fuerte), por lo general el dicromato de potasio, en condiciones acidas y con elevada temperatura. La DQO es importante como parámetro de concentración orgánica en aguas residuales, industriales o municipales que son toxicas a la vida biológica. Las aguas residuales domesticas crudas tienen DQO promedio de 250 a 1000 mg/L con relaciones de DQO/DBO que generalmente varían entre 1.2 y 2.5 (Romero, J.2013).

➤ Fósforo total

Al igual que el nitrógeno, el fósforo es un nutriente primordial para la adaptación y crecimiento de protistas y plantas, cuando se presenta exceso de fósforo en los cuerpos hídricos superficiales debe ser removido debido a que genera problemas de contaminación como es la eutrofización. En aguas residuales domesticas la cantidad de fósforo se presenta en un rango de 6 y 20 mg/L; químicamente se presentan como ortofosfatos, polifosfatos y fosfatos orgánicos, muchos de estos son esenciales para el metabolismo biológico. El fósforo orgánico es de gran importancia en las aguas residuales vertidas de uso industrial y de igual forma para la caracterización de los lodos.

➤ Nitrógeno total

El nitrógeno es un nutriente esencial para la adecuada bio-descomposición en las aguas residuales, el nitrógeno orgánico presente en el agua residual lo componen parte de compuestos tales como: proteínas, polipéptidos y aminoácidos. Se denomina NTK nitrógeno total Kjeldahl, que es el nitrógeno orgánico más el amoniacal. Las cantidades de nitrógeno son esenciales evaluarlas en el agua residual para determinar si estas requieren de tratamientos biológicos. La microfauna (microbiota) presente en las aguas residuales descompone nitrógeno orgánico en nitrógeno amoniacal y si el medio es aerobio en nitritos y nitratos.

En aguas residuales domesticas la concentración de nitrógeno total oscila entre 30 a 100 mg/L; la de nitrógeno amoniacal de 5 a 20 mg/L y la de nitritos y nitrados es < 1 mg/L. La presencia de nitrógeno amoniacal en exceso de 1600 mg/L es considerada perjudicial para muchos microorganismos presentes en el proceso de lodos activados.

➤ Características Biológicas del agua residual

El componente Biológico es básico en las aguas residuales, donde habita una capacidad metabólica, y, en consecuencia, potencialidad de transformación de sustancias químicas, orgánicas y físicas.

La presencia de microorganismos en las aguas residuales, como las bacterias, actinomicetos, hongos, algas y la fauna constituida por los detritívoros que funcionan degradando ciertos elementos que son fundamentales para los sistemas biológicos de tratamiento de las aguas residuales. Los compuestos orgánicos en las aguas residuales son un medio de cultivo que permite el desarrollo de los microorganismos que realizan los ciclos biogeoquímicos de elementos como el azufre, el carbono, el nitrógeno o el fósforo, generando una competencia donde se eliminan los elementos microbianos patógenos que se pueden encontrar en el medio. (10)

Un indicador muy empleado para la contaminación microbiana del agua es el grupo de los microorganismos Coliformes. Los Coliformes son indicadores favorables de contaminación microbiana porque muchos de ellos habitan en grandes cantidades en el tracto intestinal del hombre y los animales. Por tanto, su presencia en el agua indica contaminación fecal. Los Coliformes son bacilos anaerobios facultativos, gramnegativos, no formadores de endosporas, que fermentan la lactosa con producción de gas a las 48 horas en una incubación a 36 °C. Por ejemplo, el grupo Coliforme incluye a *Enterobacter* que es normalmente e inócua, al frecuente organismo intestinal *Escherichia Coli* que solo ocasionalmente es patógeno, y a *Klebsiella pneumoniae*, que es un patógeno menos frecuente que es menos patógeno.

En general, la presencia en una muestra de agua de Coliformes totales, o especialmente de *E. Coli*, indica una contaminación fecal que hace el agua no apta para el consumo humano. *E.coli* es una bacteria Gram negativa de forma bacilar y es miembro de la familia *Enterobacteriaceae*. Es aeróbica y anaeróbica facultativa y tiene un tamaño aproximado de 0,5 a 2 micras (11).

Escherichia Coli, forma parte de la flora intestinal del ser humano y de otros animales y es indicadora de contaminación con materia fecal y de la presencia de patógenos en el agua (12), cuando estos microorganismos entran en contacto con el agua residual, las condiciones ambientales son muy diferentes, por lo tanto, su reproducción es limitada, de modo que los Coliformes Fecales no son indicadores eficientes de contaminación fecal, porque desaparecen rápidamente. (13)

2.4 Cinética de remoción

Los experimentos cinéticos permiten analizar la velocidad a la que se generan las reacciones, en otras palabras, las concentraciones de algunas especies moleculares cambian en función del tiempo por ende las velocidades de reacción también y cómo estas velocidades varían según las concentraciones de reactivos que son directamente proporcionales al mecanismo de reacción. (Rodríguez,2011).

2.4.1 Velocidad de remoción

La velocidad de la reacción se define como la variación de la concentración de una especie molecular con respecto al tiempo (velocidad), su valor específico es de cada

reacción, no depende de las concentraciones de los reactivos, pero si cambia con la temperatura.

La ecuación de velocidad puede mencionarse como el producto de una constante por las concentraciones altas a cierta potencia, presentada en la ecuación 1 (Rodríguez, 2011).

$$v = k * A^{\alpha} * B^{\beta} \text{ Ecuacion (1)}$$

El exponente α se denomina orden de la reacción respecto al reactivo A. De igual forma, el exponente β es el orden de la reacción respecto al reactivo B. La adición de todos los componentes, esto es $\alpha + \beta + \dots$ se le denomina orden total de la reacción (Rodríguez, 2011).

La velocidad de la reacción es fundamental determinarla porque expresa la rapidez con la que se generan las reacciones químicas del proceso para el cambio de un compuesto en otro, a partir de su constante es puede emplear un diseño adecuado del sistema de tratamiento efectivo (Rodríguez, 2011).

2.4.2 Orden de la reacción

El orden cinético general de una reacción se evidencia por la cantidad de concentraciones que se expresan a la derecha de la expresión de velocidad (Rodríguez, 2011).

Primer orden

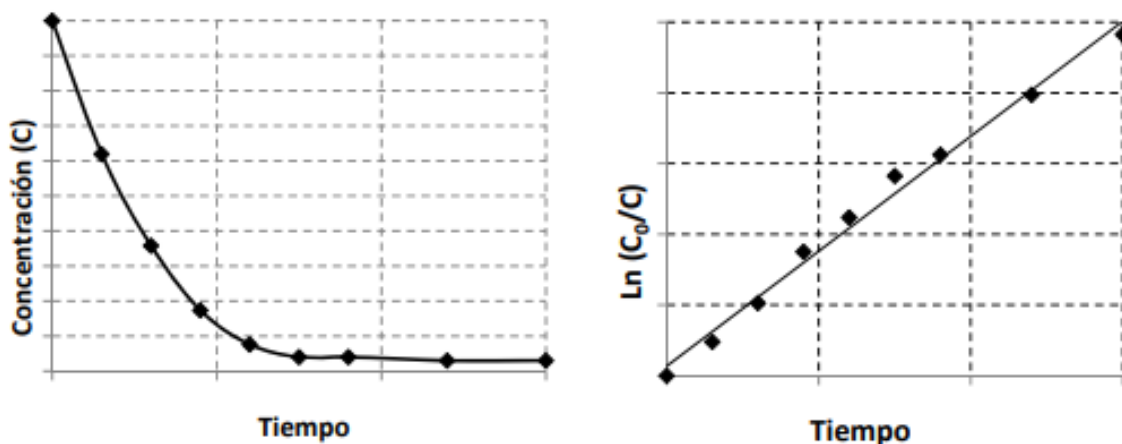
Las reacciones de primer orden son aquellas que la velocidad a la cual se genera es directamente proporcional a la primera potencia de la concentración de la sustancia que reacciona, en la ecuación 2, se presenta una ecuación de primer orden (14).

$$C_e = C_0 \cdot e^{-k_1 \cdot t} \text{ Ecuación (2)}$$

Donde C_e es la concentración del contaminante de la salida del sistema (mg/L), C_0 es la concentración del contaminante de la entrada del sistema (mg/L), t es el tiempo de retención hidráulico (d) y k_1 es la constante de la velocidad de la reacción de primer orden (d^{-1}).

Se genera una gráfica exponencial decreciente para el avance de la concentración con respecto al tiempo del contaminante C_0 , obteniendo una cinética de primer orden. En las reacciones de primer orden se produce una relación lineal entre el \ln [reactivo] y el tiempo, la pendiente de este tipo de reacciones es $-K$, como se evidencia en la Figura 1.

Figura 1. Comportamiento de una reacción con cinética de primer orden.



Fuente: Adaptada de Cinética (2001).

Segundo orden

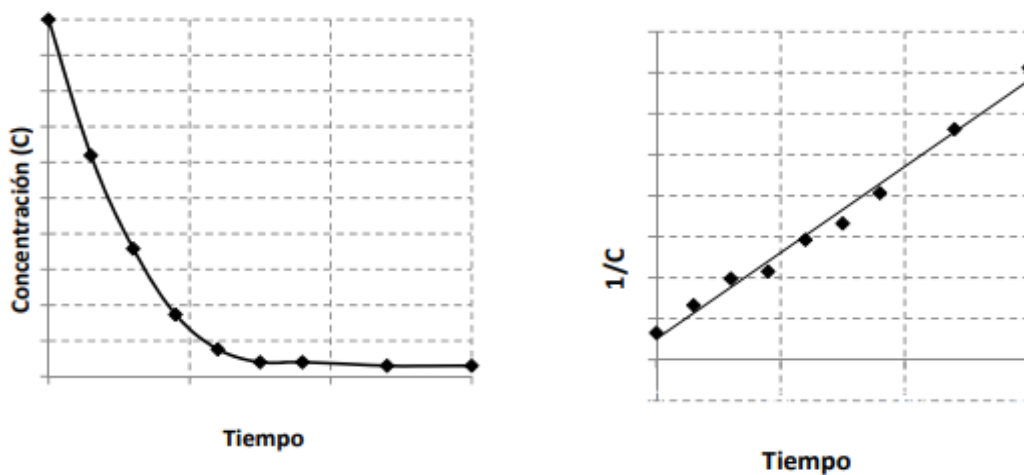
Las reacciones de segundo orden para el mismo reaccionante se expresan como la ecuación 3:

$$\frac{1}{c} = Kt + \frac{1}{c_0} \text{ Ecuación (3)}$$

Donde C es la concentración del contaminante de salida del sistema (mg/L), C₀ es la concentración del contaminante de la entrada (mg/L), t es el tiempo de retención hidráulico (d) y K es la constante de la velocidad de la reacción de primer orden (d⁻¹). (14)

Por medio de la representación gráfica 1/c con respecto al tiempo (**Figura 2**) es factible hallar la constante de velocidad K la cual representa la pendiente.

Figura 2. Comportamiento de una reacción con cinética de segundo orden.



Fuente: Adaptada de Cinética Química (2001).

2.5 Modelo matemático para Humedales Artificiales

Un modelo matemático es una representación reducida, por medio de ecuaciones, funciones, fórmulas matemáticas o de la relación entre dos o más variables. Son empleados para analizar fenómenos naturales, sociales, físicos, según el objetivo y diseño que se desee alcanzar para pronosticar el valor de las variables futuras, realizar hipótesis, estimar los efectos de una determinada actividad. (15).

En la Tabla 3, se puede observar los parámetros DBO, nitrógeno total, fósforo total para poder ajustar el modelamiento matemático que corresponde una serie de referencia, sistema, ecuación, rango de entrada- salida, rango q y la linealidad de la recta (R^2). En donde las primeras tres columnas se mencionan el parámetro, la referencia y una breve descripción del sistema, en la cuarta columna se indica la ecuación de regresión y las siguientes tres columnas dan los rangos de concentraciones de afluentes y efluentes, rango q y la última columna indica el coeficiente de linealidad (R^2) (16).

Tabla 3. Modelos matemáticos de regresión lineal, para determinar valores de DBO, Nitrógeno y fósforo.

| Parámetro | Referencia | Sistema | Ecuación | Rango de entrada | Rango de salida | Rango q | R ² |
|-----------|-------------------|---------------------------------|---|------------------------|------------------------|------------------|----------------|
| DBO | Brix | Danish and UK soil-based SSF | $C_{out} = (0.11 \cdot C_{in}) + 1.87$ | $1 < C_{in} < 330$ | $1 < C_{out} < 50$ | $0.8 < q < 22$ | 0.74 |
| | Knight et al. | US gravel beds (NADB) | $C_{out} = (0.33 \cdot C_{in}) + 1.4$ | $1 < C_{in} < 57$ | $1 < C_{out} < 36$ | $1.9 < q < 11.4$ | 0.48 |
| | Griffin et al. | US unplanted rock-filter | $C_{out} = 502.20 \cdot \exp(-0.111 \cdot T)$ | $10 < T < 30$ | n.g | n.g | 0.69 |
| | Vymazal | SSF in Czech Republic | $C_{out} = (0.099 \cdot C_{in}) + 3.24$ | $5.8 < C_{in} < 328$ | $1.3 < C_{out} < 51$ | $0.6 < q < 14.2$ | 0.33 |
| | Reed and Brown | 14 US SSF | $L_{removed} = (0.653 \cdot L_{in}) + 0.292$ | $4 < L_{in} < 145$ | $4 < L_{removed} < 88$ | n.g | 0.97 |
| | Vymazal | SSF in Czech Republic | $L_{out} = (0.145 \cdot L_{in}) - 0.06$ | $6 < L_{in} < 76$ | $0.3 < L_{out} < 11$ | n.g | 0.85 |
| | Vymazal | SSF in Czech Republic | $L_{out} = (0.13 \cdot L_{in}) + 0.27$ | $2.6 < L_{in} < 99.6$ | $0.32 < L_{out} < 11$ | $0.6 < q < 14.2$ | 0.57 |
| NITROGENO | Kadlec and Knight | NADB + others | $C_{out} = 2.6 + (0.46 \cdot C_{in}) + (0.124 \cdot q)$ | $5.1 < C_{in} < 58.6$ | $2.3 < C_{out} < 37.5$ | $0.7 < q < 48.5$ | 0.45 |
| | Kadlec et al. | Danish soil-based SSF | $C_{out} = (0.52 \cdot C_{in}) + 3.1$ | $4 < C_{in} < 142$ | $5 < C_{out} < 69$ | $0.8 < q < 22$ | 0.63 |
| | Vymazal | SSF in Czech Republic | $C_{out} = (0.42 \cdot C_{in}) + 7.68$ | $16.4 < C_{in} < 93$ | $10.7 < C_{out} < 49$ | $1.7 < q < 14.2$ | 0.72 |
| | Vymazal | SSF in Czech Republic | $L_{out} = (0.67 \cdot L_{in}) - 18.75$ | $300 < L_{in} < 2400$ | $200 < L_{out} < 1550$ | n.g. | 0.96 |
| | Vymazal | SSF in Czech Republic | $L_{out} = (0.68 \cdot L_{in}) + 0.27$ | $145 < L_{in} < 1894$ | $134 < L_{out} < 1330$ | $1.7 < q < 14.2$ | 0.96 |
| FOSFORO | Kadlec and Knight | US, European and Australian SSF | $C_{out} = 0.51 \cdot C_{in}^{1.1}$ | $0.5 < C_{in} < 20$ | $0.1 < C_{out} < 15$ | n.g | 0.64 |
| | Kadlec and Knight | US SSF | $C_{out} = 0.23 \cdot (q^{0.6} \cdot C_{in}^{0.76})$ | $2.3 < C_{in} < 7.3$ | $0.1 < C_{out} < 6$ | $2.2 < q < 44$ | 0.60 |
| | Brix | Danish soil-based SSF | $C_{out} = (0.65 \cdot C_{in}) + 0.71$ | $0.5 < C_{in} < 19$ | $0.1 < C_{out} < 14$ | $0.8 < q < 22$ | 0.75 |
| | Vymazal | SSF in Czech Republic | $C_{out} = (0.26 \cdot C_{in}) + 1.52$ | $0.77 < C_{in} < 14.3$ | $0.4 < C_{out} < 8.4$ | $1.7 < q < 14.2$ | 0.23 |
| | Vymazal | SSF in Czech Republic | $L_{out} = (0.58 \cdot L_{in}) - 4.09$ | $25 < L_{in} < 320$ | $20 < L_{out} < 200$ | n.g. | 0.61 |
| | Vymazal | SSF in Czech Republic | $L_{out} = (0.67 \cdot L_{in}) - 9.03$ | $28 < L_{in} < 307$ | $11.4 < L_{out} < 175$ | $1.7 < q < 14.2$ | 0.58 |

Fuente: (19)

2.6 Análisis estadístico

El Análisis de la varianza puede considerarse como un caso particular de la modelización econométrica, donde el grupo de variables explicativas son variables ficticias y la variable dependiente es de tipo continuo. En tales situaciones la estimación del modelo significa la realización de un análisis de la varianza clásica (ANOVA), donde su reconocimiento ha sido amplio en los estudios y diseños experimentales. (17)

El análisis de la varianza (ANOVA) es una herramienta estadística que aporta gran rendimiento en el laboratorio de análisis para el control de métodos analíticos. La aplicación del ANOVA es múltiple y depende de lo que se quiere alcanzar, el cual se divide en dos: (18)

1. La comparación de múltiples columnas de datos
2. La estimación de los componentes de variación de un proceso.

Otra herramienta que se emplea para el análisis de datos obtenidos es el software SPSS que es un conjunto de herramientas de tratamiento de datos para el análisis estadístico, para crear tablas y graficas con data completa. El SPSS es conocido por su capacidad de obtener y analizar grandes cantidades de datos.

Para el análisis estadístico de los parámetros analizados se puede utilizar el software minitab, que es una herramienta compacta, versátil y de fácil manejo, se enfoca en el análisis de datos complejos y a la identificación y resolución de problemas relativos a procesos.

Adicionalmente para llevar a cabo un diseño completamente aleatorizado de datos se puede usar el software minitab, que facilita la exploración de datos con gráficos, y sirve para realizar análisis estadísticos, evaluando la calidad de un proceso y sirve para la formulación de un diseño de experimentos.

Los modelos de diseño de experimentos empleados fueron:

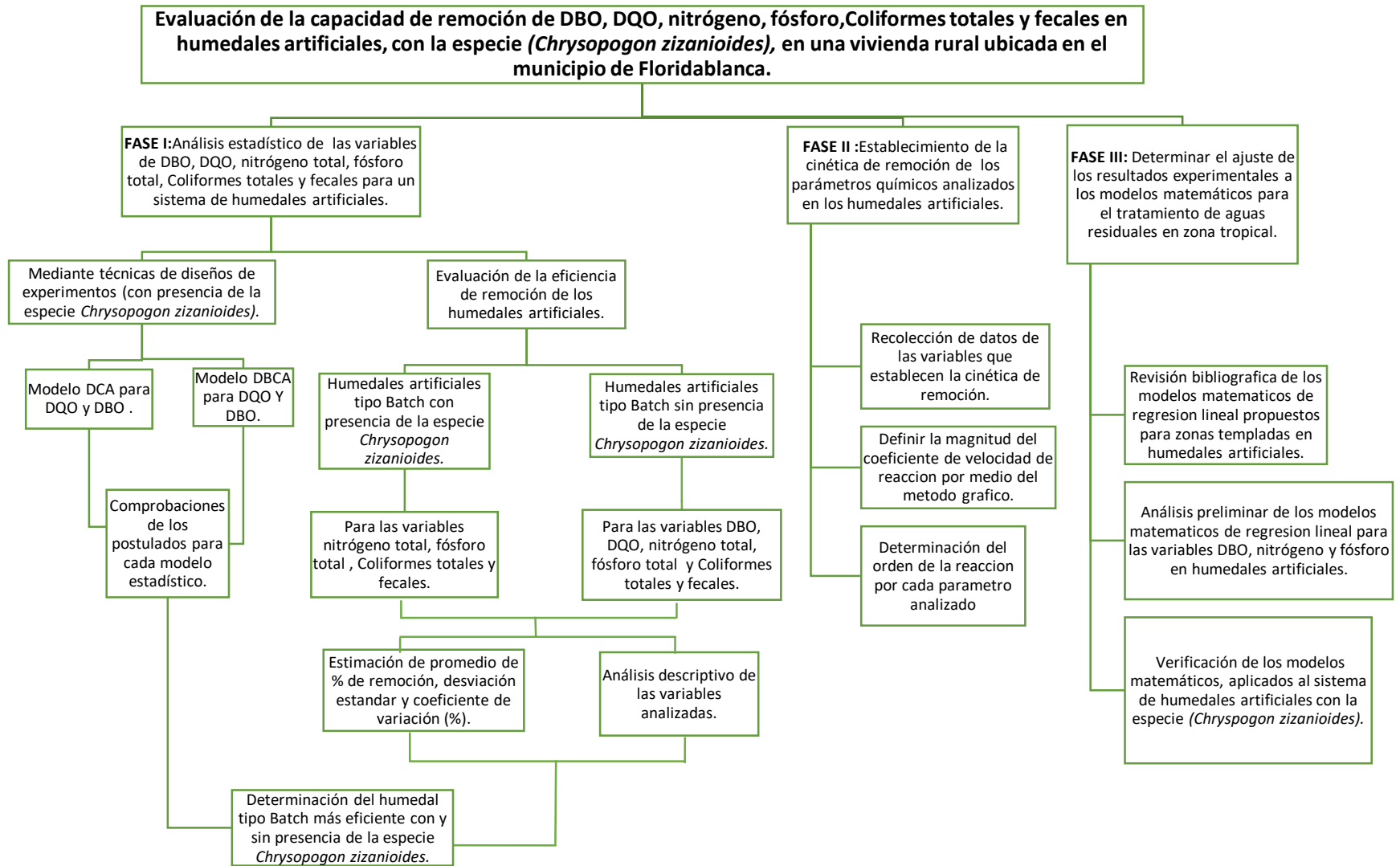
- **MODELO DCA:** es un modelo completamente al azar, el cual se utiliza para comparar dos o más tratamientos, donde solo se consideran dos fuentes de variabilidad: los tratamientos y el error aleatorio.
- **MODELO DBCA:** es un modelo de diseño de bloques completos al azar, en donde se tienen tres posibles “culpables” de la variabilidad presente en los datos. En el DBCA cada bloque se prueba con todos los tratamientos. (19)

3 METODOLOGÍA

El trabajo realizado se llevó a cabo en una vivienda rural en el municipio de Floridablanca, Santander, en tres fases. En la primera fase se analizaron estadísticamente los parámetros químicos de DBO, DQO a través de modelos estadísticos de diseños de experimentos por el número de datos experimentales recolectados. Para las variables químicas y biológicas como nitrógeno total, fósforo total, Coliformes totales y fecales se evaluaron por medio del porcentaje de remoción y un análisis descriptivo con la presencia de la especie *Chrysopogon zizanioides*, con el fin de comparar la capacidad de fitorremediación. En la segunda fase, se estableció la cinética de remoción de los humedales para los parámetros químicos analizados y por último se determinó el ajuste de los resultados experimentales a los modelos matemáticos de ecuaciones de regresión lineal ampliamente aceptados por la comunidad científica propuestos para el funcionamiento tipo Bach en los humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales en zona tropical para las variables DBO, Nitrógeno, Fósforo.

En la **figura 3** se presenta un esquema de la metodología a realizar para este proyecto.

Figura 3. Esquema de metodología.



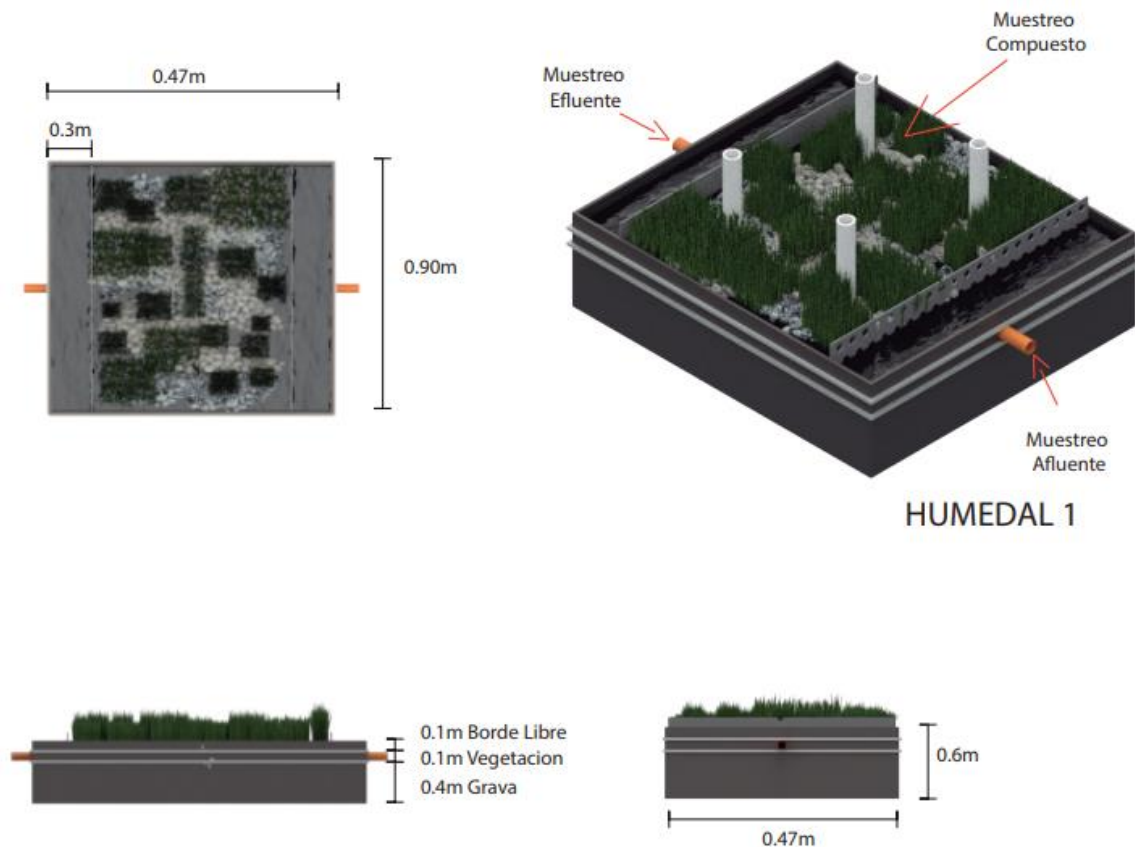
Fuente: Autores.

Para dar cumplimiento a las actividades anteriormente propuestas es necesario explicar el lugar de estudio del proyecto, las condiciones de los humedales artificiales, dimensiones específicas de cada humedal.

3.1 Localización de humedales y muestreo

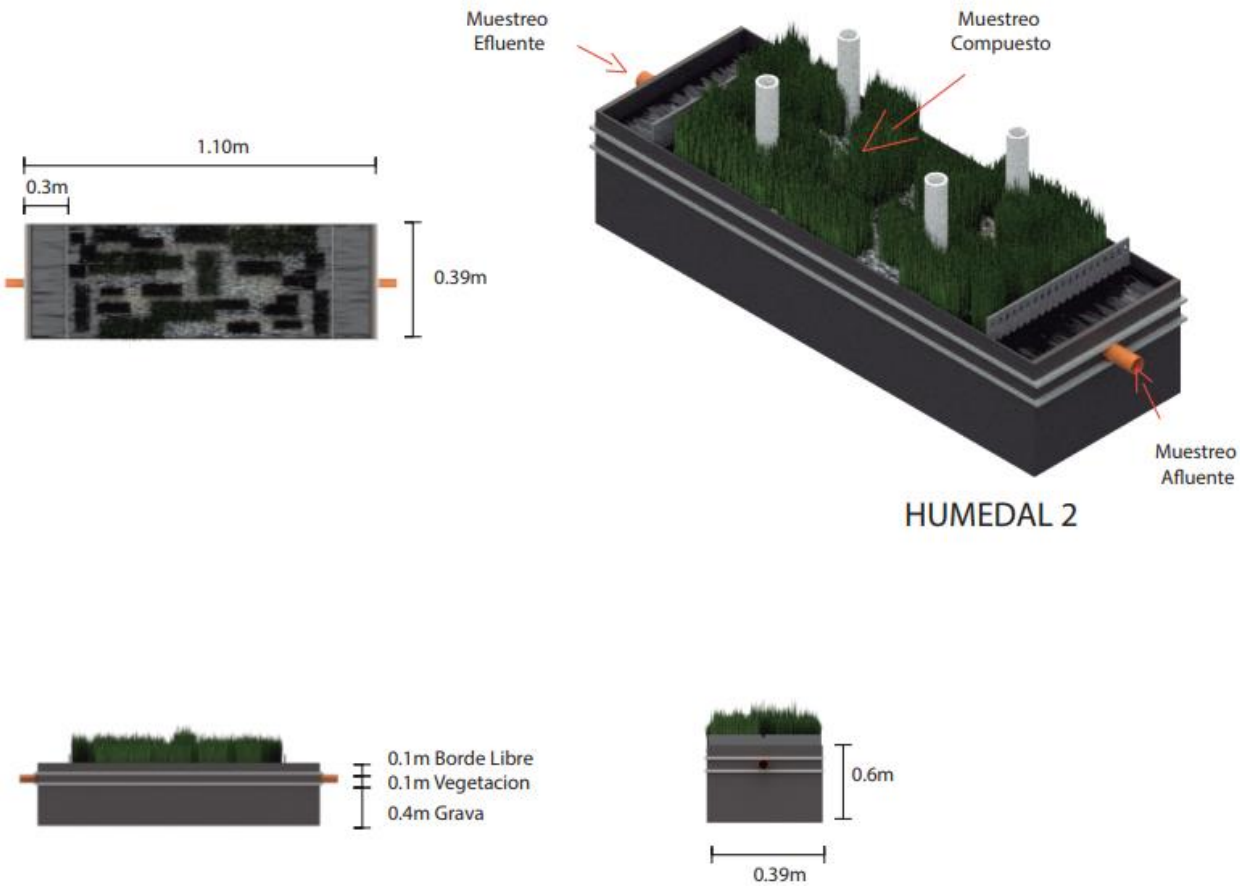
El proyecto se llevó a cabo en un sistema de humedales artificiales con la especie (*Chrysopogon zizanioides*), así mismo se evaluó los humedales sin la especie para establecer criterios de comparación. Los humedales se encuentran ubicados en el área de la vereda Casiano Bajo, del municipio de Floridablanca en el departamento de Santander, Colombia. La configuración de cada humedal artificial tiene un dimensionamiento, el humedal 1: 0,47m (ancho) -0,9 m (largo), el humedal 2: 0,39 m (ancho) -1,10 m (largo) y el humedal 3: 0,35 m (ancho) – 1,30 m (largo). En la **figura 4, 5 y 6** se presenta el dimensionamiento de los humedales 1, 2 y 3 con la especie (*Chrysopogon zizanioides*).

Figura 3. Dimensionamiento del sistema del humedal artificial 1 con la especie (*Chrysopogon zizanioides*).



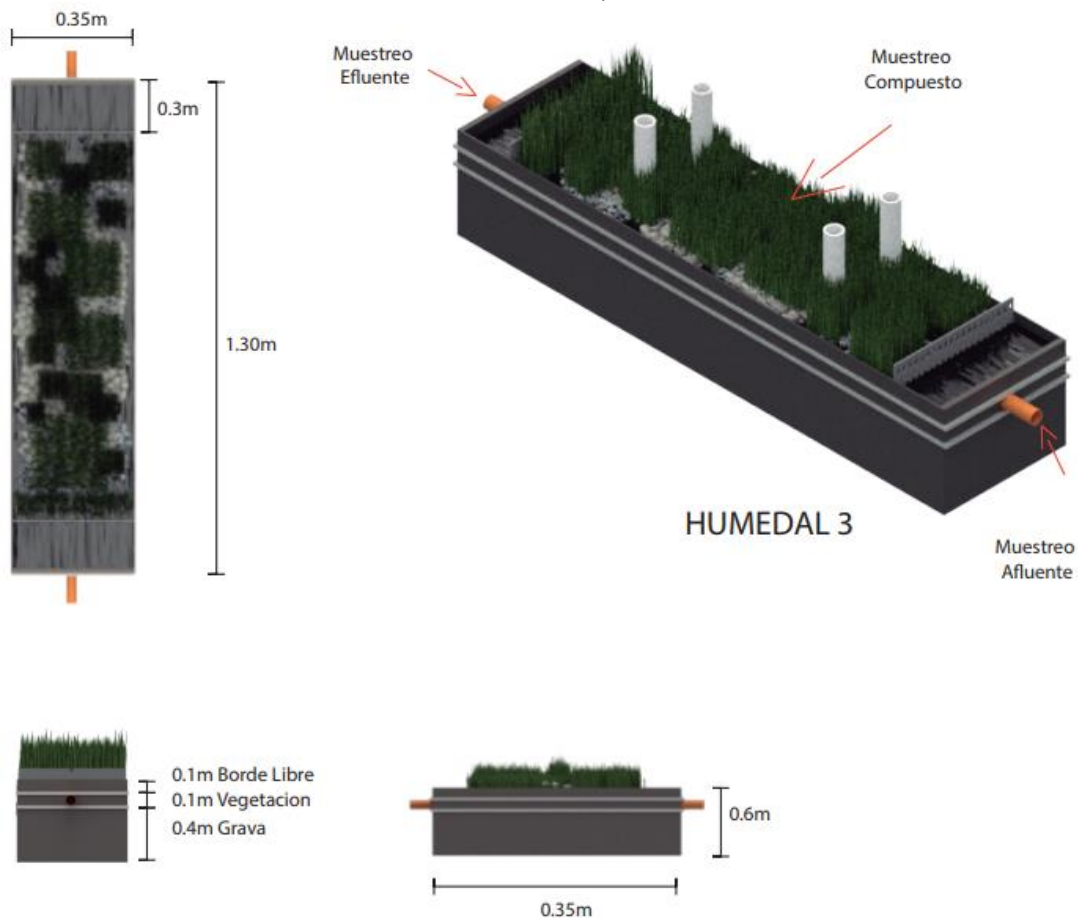
Fuente: Autores.

Figura 4. Dimensionamiento del sistema de humedal artificial 2 con la especie (*Chrysopogon zizanioides*)



Fuente: Autores.

Figura 5. Dimensionamiento del sistema de humedal artificial 3 con la especie (*Chrysopogon zizanioides*)



Fuente: Autores.

En el presente estudio los humedales se encuentran en un funcionamiento tipo Batch, las aguas residuales domesticas de la vivienda rural provienen de duchas, descargas de sanitarios, de la cocina, limpiezas en general y el uso de la lavadora. La vivienda rural está habitada por 5 personas y cuenta con un pretratamiento de sus aguas residuales, las cuales pasan por un tanque séptico de 2 m³ de doble cámara que permite sedimentación y eliminación de sólidos flotantes como tratamiento preliminar de sus aguas residuales. Después del sistema inicial se cuenta con un tanque de almacenamiento para poder distribuir el agua residual domestica al sistema de humedales artificiales.

3.2 FASE I: Análisis estadístico de las variables de DBO, DQO, nitrógeno, fosforo, coliformes totales y fecales para un sistema de humedales artificiales.

Para analizar las variables fisicoquímicas de los humedales se realizó primero un análisis de modelos de diseños de experimentos para las variables DQO y DBO con

presencia de la especie *Chrysopogon zizanioides* y el segundo una evaluación del porcentaje de remoción a través de un análisis descriptivo de las variables nitrógeno total, fósforo total, coliformes totales y fecales, de igual forma para las muestras blanco de las variables DQO y DBO. En la **tabla 4**, se muestran los métodos que se llevaron a cabo en el laboratorio, para el análisis de los parámetros químicos y biológicos (20)

Tabla 4. Métodos para la evaluación de los parámetros fisicoquímicos y biológicos en los humedales.

| Parámetros | Métodos |
|-------------------------------------|--|
| Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) | Standard Methods, 5210 22nd and 23rd Edition |
| Demanda Química de Oxígeno (DQO) | Standard Methods, 5220 22nd and 23rd Edition |
| Coliformes Totales Y Fecales | Standard Methods, SM 9222 B |
| Nitrógeno total | Standard Methods, 4500 C 21th Edition |
| Fósforo total | Standard Methods, 4500 E 21 th Edition |

Fuente: (22)

En la **tabla 5** se presentan los parámetros y las variables a evaluar en el presente estudio para el sistema de humedales artificiales con la especie (*Chrysopogon zizanioides*) con el funcionamiento tipo Batch.

Tabla 5. Parámetros en los humedales artificiales para aguas residuales domésticas.

| PARAMETROS | |
|-------------------|---|
| Variables | DQO, DBO, nitrógeno total, fósforo total Coliformes totales y fecales relación Geométrica (Largo: Ancho) Condiciones Ambientales |
| Constantes | vegetación tiempo de permanencia medio filtrante (Grava) |
| Respuesta | Porcentaje de remoción de materia orgánica en términos de DBO, DQO, nitrógeno, fósforo, Coliformes totales y fecales |

Fuente: Autores.

3.2.1 Muestreo de agua residual tratada en los humedales

Para la recolección de las muestras de agua residual proveniente de los humedales artificiales con la especie (*Chrysopogon zizanioides*) "IN SITU", se capturaron muestras para cada humedal en un periodo de seis semanas cumpliendo con tres ciclos consecutivos, teniendo en cuenta el funcionamiento tipo Batch. En el muestreo se recolectó agua residual de cada humedal en tres puntos estratégicos, en el afluente, en el intermedio (muestras compuestas) y en el efluente de cada humedal, las muestras compuestas fueron recolectadas para los parámetros de DBO, DQO, nitrógeno total, fósforo total, Coliformes totales y fecales como se muestra en la **figura 4, 5 y 6**.

De igual forma para la recolección de las muestras de agua residual proveniente de los humedales artificiales sin la presencia de la especie (*Chrysopogon zizanioides*), se capturaron muestras para cada humedal en un periodo de cuatro semanas cumpliendo con dos ciclos consecutivos, teniendo en cuenta el funcionamiento tipo batch. En el muestreo se recolectó agua residual de cada humedal en dos puntos estratégicos, en el afluente y en el efluente, las muestras fueron captadas para los parámetros de DBO, DQO, nitrógeno total, fósforo total, Coliformes totales y fecales.

3.2.2 Recolección de muestras

Para las muestras de DBO, DQO, nitrógeno total, fósforo total se recolectó un volumen de 600 mL de agua residual por separado en tarros plásticos, donde se mantuvieron refrigeradas con barras de hielo, para posteriormente ser preservadas y analizadas en el laboratorio de aguas residuales de la Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga.

Para el análisis de Coliformes totales y fecales en agua residual, las muestras se recogieron en frascos esterilizados, conservadas en hielo, para ser llevados al Laboratorio de Consultas Industriales de la Universidad Industrial de Santander (UIS).

Durante el tiempo de permanencia del agua residual en los humedales se recolectaron muestras a los 3, 4 y 7 días en cuatro puntos intermedios en los humedales artificiales (muestra compuesta), con el fin de evaluar la capacidad de remoción del sistema de humedales. Este procedimiento se llevó a cabo debido a que los habitantes no permanecen en la vivienda continuamente, por lo tanto, no hay la suficiente descarga de agua residual producto de las actividades domésticas.

En la **tabla 6** se muestra las variables a analizar, con los ciclos, puntos de muestreo y días correspondientes para cada humedal con la especie (*Chrysopogon zizanioides*), así mismo en la **tabla 7** sin la presencia de la especie anteriormente mencionada.

Tabla 6. Ciclos, puntos de muestreo, días y variables para cada humedal con la especie (*Chrysopogon zizanioides*).

| CICLO | PUNTO DE MUESTREO | DIAS | HUMEDAL 1 | HUMEDAL 2 | HUMEDAL 3 |
|----------------|-------------------|---------|--|--|--|
| Ciclo 1 | Afluente | 0 | DBO, DQO, N, P, Coliformes totales y fecales | DBO, DQO, N, P, Coliformes totales y fecales | DBO, DQO, N, P, Coliformes totales y fecales |
| | Compuesta | 3,4 y 7 | | | |
| | Efluente | 11 | | | |
| Ciclo 2 | Afluente | 0 | DBO, DQO, N, P, Coliformes totales y fecales | DBO, DQO, N, P, Coliformes totales y fecales | DBO, DQO, N, P, Coliformes totales y fecales |
| | Compuesta | 3,4 y 7 | | | |
| | Efluente | 11 | | | |
| Ciclo 3 | Afluente | 0 | DBO, DQO, N, P, Coliformes totales y fecales | DBO, DQO, N, P, Coliformes totales y fecales | DBO, DQO, N, P, Coliformes totales y fecales |
| | Compuesta | 3,4 y 7 | | | |
| | Efluente | 11 | | | |

Fuente: Autores.

Tabla 7. Ciclos, puntos de muestreo, días y variables para cada humedal sin la presencia de la especie (*Chrysopogon zizanioides*).

| CICLO | PUNTO DE MUESTREO | DIAS | HUMEDAL 1 | HUMEDAL 2 | HUMEDAL 3 |
|----------------|-------------------|------|--|--|--|
| Ciclo 1 | Afluente | 0 | DBO, DQO, N, P, Coliformes totales y fecales | DBO, DQO, N, P, Coliformes totales y fecales | DBO, DQO, N, P, Coliformes totales y fecales |
| | Efluente | 11 | | | |
| Ciclo 2 | Afluente | 0 | DBO, DQO, N, P, Coliformes totales y fecales | DBO, DQO, N, P, Coliformes totales y fecales | DBO, DQO, N, P, Coliformes totales y fecales |
| | Efluente | 11 | | | |

Fuente: Autores

El muestreo se llevó a cabo en dos etapas, en la primera etapa se realizó el muestreo con la presencia de la especie (*Chrysopogon zizanioides*) y en la segunda etapa sin presencia de la especie anteriormente mencionada. En los tres humedales artificiales, con el funcionamiento tipo batch, con el fin de comparar si realmente hay remoción de materia orgánica por la presencia de dicha especie, según los parámetros químicos y biológicos analizados.

3.2.3 Evaluación de la eficiencia de remoción de los parámetros químicos y biológicos en los humedales artificiales tipo Batch

Para la evaluación del porcentaje de remoción de DQO, DBO₅, nitrógeno total, fósforo total, Coliformes totales y fecales del sistema de humedales artificiales con y sin la especie (*Chrysopogon zizanioides*) con su respectivo ciclo, evaluando la remoción por medio de la fórmula:

$$\%Remoción = \frac{Concentración\ Afluyente - Concentración\ Efluyente}{Concentración\ Afluyente} * 100$$

Ecuación (4)

Con la eficiencia de remoción de los contaminantes se estableció una comparación del funcionamiento de los tres humedales artificiales tipo Batch a través de un análisis descriptivo con la especie (*Chrysopogon zizanioides*) con su respectivo ciclo. Así mismo para los humedales artificiales sin la presencia de la especie, teniendo en cuenta la desviación y el coeficiente de variación de cada uno sin olvidar la variación en la dimensión de cada uno.

3.2.4 Análisis mediante técnicas de diseños de experimentos de las variables DBO₅, DQO con la presencia de la especie Chrysopogon zizanioides.

El análisis estadístico de los valores de DBO₅ y DQO con la presencia de la especie *Chrysopogon zizanioides* en cada punto de muestreo, se realizó por medio de softwares, en el cual se determinó la varianza entre los datos, uno de estos es el software Anova One Way que es un método que permitió comparar medias de uno o más grupos si son o no significativas diferentes de otras. Para esto se estableció una hipótesis probable y una hipótesis nula donde se pudo evaluar los resultados obtenidos de los valores de DBO₅ y DQO.

Se determinó la varianza entre los datos, utilizando las herramientas como minitab y SSPS, los cuales sirvieron para el análisis de los datos aleatorios.

La metodología que se llevó a cabo para el análisis estadístico fue a través del modelo DCA y DBCA, como se muestra en la ecuación 5 y 6(21):

3.2.4.1 Identificación del Modelo DCA (bloques aleatorizados)

Se Identificó el modelo DCA (bloques aleatorizados), en el cual se determinó las variables respuesta (DBO-DQO), factor (nivel 0, 1, 2, 3) y forma de muestreo, el modelo DCA se expresa mediante la siguiente ecuación 3:

Método DCA (bloques aleatorizados) Ecuación (5)

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij}$$

3.2.4.2 Identificación del Modelo DBCA (bloques completos al azar)

Se Identificó el modelo DBCA (bloques completos al azar), en el cual se determinó el factor de tratamiento (Humedales artificiales) y el factor de bloques (puntos de

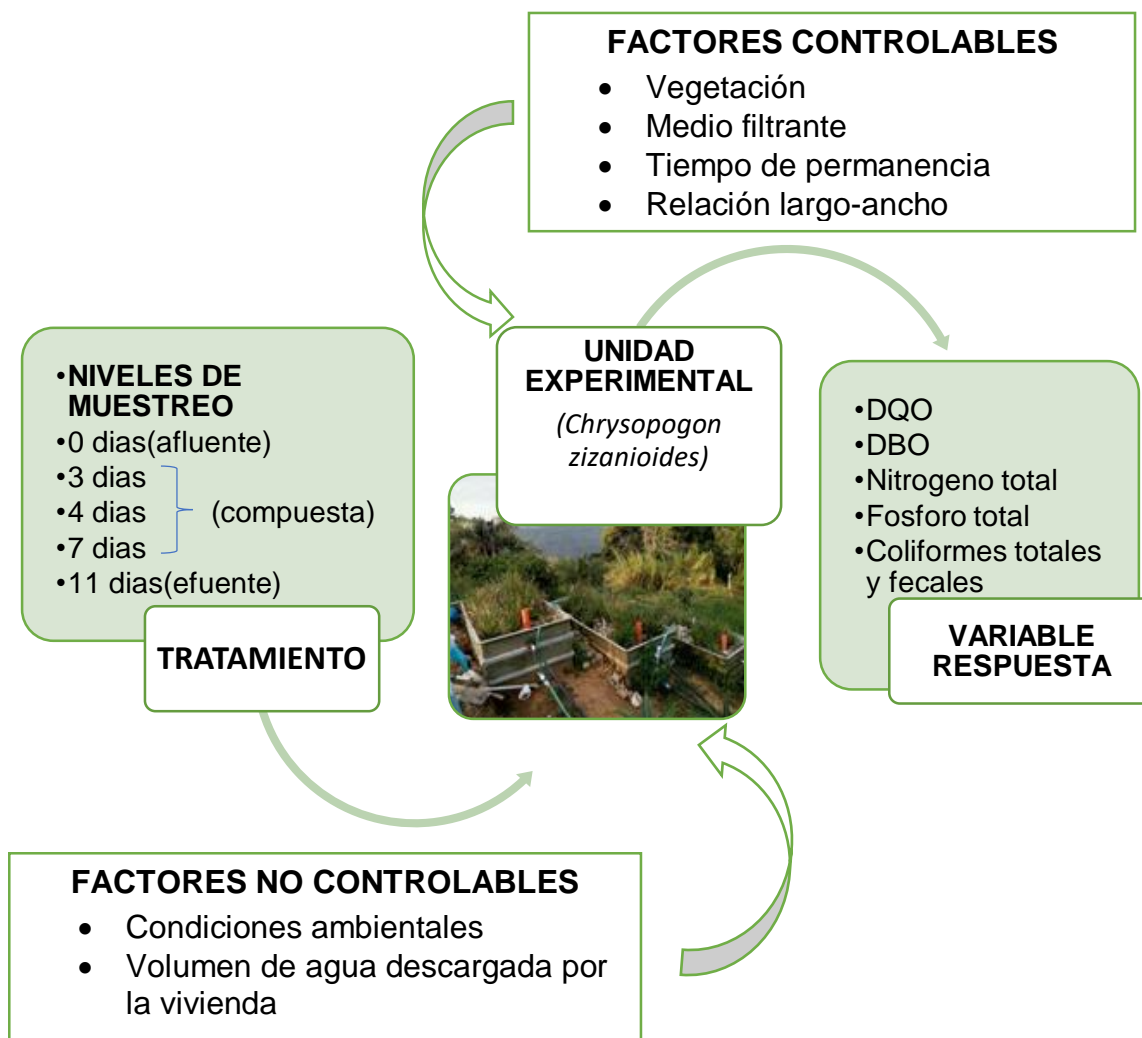
muestreo), con el fin de comparar cuál de los tres humedales artificiales fue más eficiente y se expresa mediante la siguiente ecuación 6:

Método DBCA (bloques aleatorizados) Ecuación (6)

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + Y_j + \varepsilon_{ij}$$

En la **figura 7** se identificó, el tratamiento, variables respuesta, los factores controlables y no controlables con la unidad experimental:

Figura 6. Tratamiento, variables respuesta, los factores controlables y no controlables con la unidad experimental en el proceso de investigación



Fuente: Autores.

Para los modelos DCA y DBCA se establecen las mismas condiciones respecto a la validación de supuestos del modelo, análisis de la varianza y análisis de comparaciones múltiples, como se muestra a continuación:

3.2.4.3 Validación de supuestos del modelo

- Prueba de normalidad

Para la validación de supuestos del modelo se realizó una validación de supuestos del modelo, en el cual se estableció la normalidad de los errores, homocedasticidad e independencia.

Para determinar la normalidad se establecieron los siguientes supuestos, utilizando la prueba de Kolmogórov-Smirnov y Shapiro–Wilk, dependiendo de cada caso, presentados en la tabla 8.

Tabla 8. Hipótesis planteadas para las pruebas estadísticas entre los humedales.

| HIPOTESIS | |
|----------------------|--|
| H₀ | Si la variable respuesta (DQO-DBO) se comporta de forma normal. |
| H | Si la variable respuesta (DQO-DBO) no se comporta de forma normal. |

Fuente: Autores.

- Análisis de la normalidad

Para el análisis de la normalidad, se tuvo en cuenta la relación del valor P:

Si el valor $P > 0.05$ no se rechaza H_0

Si el valor $P < 0.01$ se rechaza H_0 , por lo tanto, la variable respuesta no se comportaría de forma normal.

- Homocedasticidad

Donde varianza en todos los niveles son iguales. se comprobó a través de la prueba de Levene usando el software IBM SPSS statics 22.

3.2.4.4 Análisis de la varianza

Para el análisis de varianza a través del software Anova One Wav. teniendo en cuenta el modelo DCA, se definió si las medias son iguales, utilizando los siguientes supuestos:

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k = \mu$$

$$H_A : \mu_i \neq \mu_j \text{ para algún } i \neq j$$

Ecuación (7)

3.2.4.5 Análisis de comparaciones múltiples

Es una técnica de gran importancia que sirvió para comparar todos los posibles pares de medias de tratamientos.

3.3 FASE II. Establecimiento de la cinética de remoción de los parámetros químicos analizados en los humedales artificiales.

4.3.1. Recolección de datos de las variables que establecen la cinética de remoción

Para el establecimiento de la cinética de remoción, se recogieron los datos necesarios en los humedales artificiales de las variables analizadas a escala de laboratorio. Posteriormente como base de referencia en el estudio, se tuvo en cuenta el trabajo de investigación ya finalizado según (22), donde se utilizaron los datos de DBO₅, DQO, nitrógeno total y fósforo total en los diferentes puntos de muestreo analizados.

3.3.1 Definición de la magnitud del coeficiente de velocidad de reacción

Se definió la magnitud del coeficiente de velocidad de reacción por medio del método gráfico con los resultados de concentración de cada parámetro analizado en el cual se generó una línea de tendencia que representa los datos obtenidos en la cinética de remoción.

Por consiguiente, se llevó a cabo una relación de los valores de la entrada y salida de cada humedal, luego se determinó el logaritmo natural para los datos y se definió la línea de tendencia más óptima que se ajusta al conjunto de puntos que tiene a $\ln(C)$ y $\ln(C_0)$ como los valores del eje de las abscisas y ordenadas en la ecuación de una recta, se obtiene el valor de k a través de la ecuación lineal, este valor de la constante de degradación entre más cercano sea a uno es más valedero.

3.3.2 Determinación del orden de la reacción por cada parámetro analizado

Con los datos obtenidos de concentración DBO₅, DQO, nitrógeno total, fósforo total se determinó el orden de la reacción por cada parámetro analizado, teniendo en cuenta la expresión de velocidad y sabiendo que el orden depende del número de concentraciones.

Donde la constante k define el orden de la cinética de remoción de los contaminantes analizados, según la relación directa o indirectamente proporcional según la gráfica.

3.4 FASE III: Determinación del ajuste de los resultados experimentales a los modelos matemáticos para el tratamiento de aguas residuales en zona tropical.

Después del establecimiento de la cinética de remoción para cada humedal artificial tipo batch, se determinará con los datos recolectados, cual modelo matemático de ecuación de regresión, ampliamente aceptado por la comunidad científica para zonas templadas, mejor se ajusta a los resultados experimentales obtenidos en zona tropical, en la vivienda rural del municipio de Floridablanca.

Para definir cuál es el modelo matemático de regresión más adecuado se determinará mediante los errores cuadráticos medios, errores promedios y errores relativos porcentuales para cada humedal y cada variable que en este caso solo se puede para las variables DBO, nitrógeno total y fosforo total por los datos experimentales que exige cada modelo los cuales no fueron determinados. (Rousseau, Vanrolleghem y De Pauw, 2004).

Los modelos de regresión lineal ampliamente aceptados por la comunidad científica son los siguientes para las variables DBO, nitrógeno total y fosforo total:

Tabla 9. Modelos matemáticos de regresión lineal, para determinar valores de DBO, Nitrógeno y fósforo totales.

| Variable | Modelo | Ecuación |
|-----------------|-------------------|-------------------------------|
| DBO | Brix | $C_{out}=(0,11*C_{in})+1,87$ |
| | Knight | $C_{out}=(0,33*C_{in})+1,4$ |
| | Vymazal | $C_{out}=(0,33*C_{in})+1,4$ |
| Fosforo total | Kadlec and Knight | $C_{out}=0,51*C_{in}^{1,1}$ |
| | Brix | $C_{out}=(0,65*C_{in})+0,71$ |
| | Vymazal | $C_{out}=(0,099*C_{in})+3,24$ |
| Nitrógeno total | Kadlec et al | $C_{out}=(0,52*C_{in})+3,1$ |
| | Vymazal | $C_{out}=(0,42*C_{in})+7,68$ |

Fuente: Autores tomado de DIEDERIK P.L. (23)

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 FASE I: Análisis estadístico de las variables DBO, DQO, nitrógeno, fósforo, coliformes totales y fecales para un sistema de humedales artificiales.

4.1.1 Análisis mediante técnicas de diseños de experimentos para las variables DBO y DQO para un sistema de humedales artificiales.

Para el análisis estadístico de los resultados se utilizó los softwares IBM SPSS statistics 15 y minitab 18. Los resultados que se emplearon para estos análisis fueron los de concentración de las variables analizadas (DBO y DQO) consideradas con suficientes datos para un análisis mediante técnicas de diseños de experimentos.

HUMEDAL 1

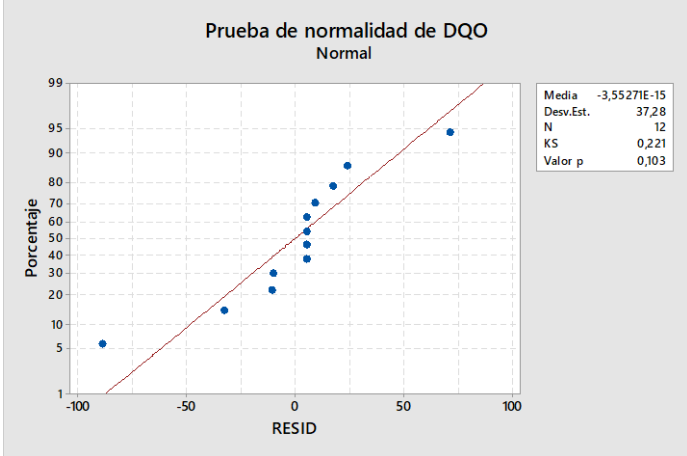
4.1.2 Análisis mediante técnicas de diseño de experimentos

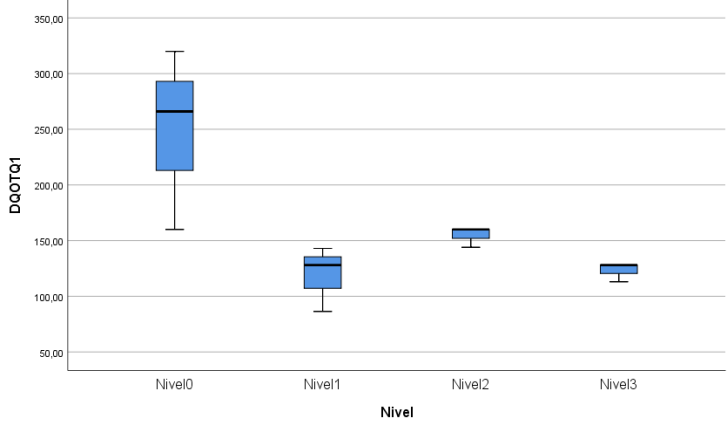
A. Variable: DQO

4.1.2.1 Validación de supuestos, análisis de varianza y comparaciones múltiples con presencia de la especie *Chrysopogon zizanioides*, para la variable DQO humedal 1.

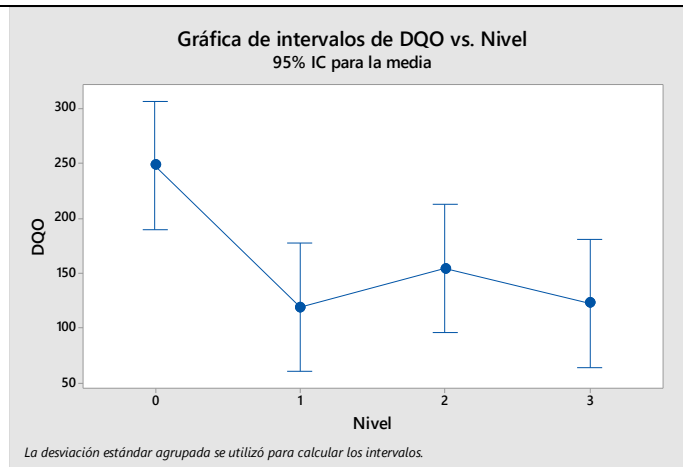
Para la variable DQO se realizaron los mismos análisis resumidos en la tabla 10 donde se presentan los resultados obtenidos para el análisis mediante técnicas de diseños de experimentos.

Tabla 10. Modelo DCA humedal 1- DQO.

| | | |
|--------------------------------------|---|--|
| VALIDACIÓN DE SUPUESTOS HUMEDAL 1 | Normalidad de los errores en el humedal 1 DQO |  |
| | | |

| | Prueba de homocedasticidad en el humedal1 DQO | Prueba de homogeneidad de varianzas | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|--|-----------------------|-----------------------|---------|---------|-------|--------|----|-----------|-----------|---------|---------|-------|---|-------|-------|------|------|-------|---|-------|------|--|--|-------|----|-------|--|--|--|
| | Prueba de independencia de errores en el humedal 1 DQO | DQOTQ1 | Se basa en la mediana | Estadístico de Levene | gl1 | gl2 | Sig. | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | 1,817 | 3 | 8 | 0,222 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ANÁLISIS DE VARIANZA | Análisis de la varianza ANOVA humedal 1 DQO | <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 10%;">Fuente</th> <th style="width: 10%;">GL</th> <th style="width: 15%;">SC Ajust.</th> <th style="width: 15%;">MC Ajust.</th> <th style="width: 15%;">Valor F</th> <th style="width: 15%;">Valor p</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Nivel</td> <td>3</td> <td>32766</td> <td>10922</td> <td>5,71</td> <td>0,22</td> </tr> <tr> <td>Error</td> <td>8</td> <td>15291</td> <td>1911</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Total</td> <td>11</td> <td>48057</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> | | | | | | Fuente | GL | SC Ajust. | MC Ajust. | Valor F | Valor p | Nivel | 3 | 32766 | 10922 | 5,71 | 0,22 | Error | 8 | 15291 | 1911 | | | Total | 11 | 48057 | | | |
| | Fuente | GL | SC Ajust. | MC Ajust. | Valor F | Valor p | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Nivel | 3 | 32766 | 10922 | 5,71 | 0,22 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Error | 8 | 15291 | 1911 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Total | 11 | 48057 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Diagrama de caja y bigotes humedal 1 variable DQO |  <p>The box plot displays the distribution of DQOTQ1 across four levels. The y-axis ranges from 50.00 to 350.00. Nivel0 shows a median around 270, with a box from approximately 215 to 295 and whiskers extending from 160 to 325. Nivel1 has a median around 125, with a box from 110 to 140 and whiskers from 90 to 145. Nivel2 has a median around 155, with a box from 150 to 165 and whiskers from 145 to 165. Nivel3 has a median around 125, with a box from 115 to 135 and whiskers from 110 to 135.</p> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Intervalos de DQO vs Nivel humedal1



ANÁLISIS DE COMPARACIONES MÚLTIPLES EN EL HUMEDAL 1

Prueba de comparaciones múltiples a la variable DQO humedal 1

| Variable dependiente: DQOTQ1 | | | | | | |
|------------------------------|-----------|----------------------------|-------------|-------|-------------------------------|-----------------|
| HSD Tukey | | | | | | |
| (I) Nivel | (J) Nivel | Diferencia de medias (I-J) | Desv. Error | Sig. | Intervalo de confianza al 95% | |
| | | | | | Límite inferior | Límite superior |
| Nivel0 | Nivel1 | 129,53333* | 35,69669 | ,028 | 15,2200 | 243,8467 |
| | Nivel2 | 94,00000 | 35,69669 | ,112 | -20,3134 | 208,3134 |
| | Nivel3 | 125,66667* | 35,69669 | ,032 | 11,3533 | 239,9800 |
| Nivel1 | Nivel0 | -129,53333* | 35,69669 | ,028 | -243,8467 | 15,2200 |
| | Nivel2 | -35,53333 | 35,69669 | ,756 | -149,8467 | 78,7800 |
| | Nivel3 | -3,86667 | 35,69669 | 1,000 | -118,1800 | 110,4467 |
| Nivel2 | Nivel0 | -94,00000 | 35,69669 | ,112 | -208,3134 | 20,3134 |
| | Nivel1 | 35,53333 | 35,69669 | ,756 | -78,7800 | 149,8467 |
| | Nivel3 | 31,66667 | 35,69669 | ,812 | -82,6467 | 145,9800 |
| Nivel3 | Nivel0 | -125,66667* | 35,69669 | ,032 | -239,9800 | 11,3533 |
| | Nivel1 | 3,86667 | 35,69669 | 1,000 | -110,4467 | 118,1800 |
| | Nivel2 | -31,66667 | 35,69669 | ,812 | -145,9800 | 82,6467 |

*. La diferencia de medias es significativa en el nivel 0.05.

Prueba de subconjuntos de comparaciones múltiples de la variable DQO humedal 1

| Nivel | N | Subconjunto para alfa = 0.05 | |
|--------|---|------------------------------|----------|
| | | 1 | 2 |
| Nivel1 | 3 | 119,1333 | |
| Nivel3 | 3 | 123,0000 | |
| Nivel2 | 3 | 154,6667 | 154,6667 |
| Nivel0 | 3 | | 248,6667 |
| Sig. | | ,756 | ,112 |

Fuente: Autores

- En la grafica de la prueba de normalidad de los errores a traves de la prueba de kormogorov smirnov , donde el valor - p arrojó un valor de 0,103 mayor a 0.05,por consiguiente H_0 no se rechaza , interpretandose que la Demanda quimica de oxigeno en el humedal 1 se comporta de forma normal en los diferentes niveles de muestreo llevados a cabo, la grafica no presenta ninguna asimetria ni a la derecha ni a la izquierda, pero si una tendencia de los puntos acercandose se a la linea recta.
- La grafica de la prueba de homogeneidad de varianzas se determinó con el software IBM SPSS statistics 15 arrojó un valor de significancia de 0,222 con respecto a las medianas, interpretándose superior al 0.05, es decir la varianza en todos los niveles de muestreo tienden hacer iguales, tanto en el afluente, la muestra compuesta y el efluente, es decir cuentan con homocedasticidad constante.
- La independencia de los errores se determinó con el software Minitab 18 para la variable DQO en el humedal 1 y se observa que son aleatorios, donde no se presentan tendencias ascendentes, descendentes o de megáfono indicando que los errores que se generan obedecen a un orden aleatorio y no cuentan con una tendencia definida.
- Análisis de la varianza ANOVA para el parámetro DQO en el humedal 1 se observa que el valor de P en el análisis de la varianza ANOVA arrojó un valor de 0,022 menor a 0.05 por consiguiente el valor de F es significativo, el factor influye en la variable dependiente, por lo menos en dos niveles del factor, producen distintos efectos en la variable dependiente.

Un Análisis complementario de la varianza que se desarrolló fue gráficamente a través del diagrama de caja y bigotes, que representa las dispersiones en los diferentes niveles o puntos de muestreo en el humedal 1 con la variable DQO, en la gráfica 2 se presenta el diagrama de caja y bigotes para la variable analizada en el humedal 1.

- En la gráfica de caja y bigotes, se observa dispersiones en los diferentes niveles de muestreo donde no se presenta diferencia significativa en la dispersión entre nivel 1 (muestra compuesta), nivel 2 (muestra compuesta) y el nivel 3(efluente) , la diferencia significativa esta entre el nivel 0(afluente) y el nivel 3 (efluente), se debe a la diferencia de materia orgánica difícilmente degradable por parte de los microorganismos que contiene el agua residual proveniente de la vivienda en comparación con la que sale del humedal 1, esta diferencia se presenta gracias al conjunto de reacciones bioquímicas en el humedal por parte de los microfauna y microflora presente allí y la actividad biológica de la especie *Chrysopogon zizanioides* .

- En la gráfica de intervalos de DQO vs los niveles (puntos de muestreo), que representa la dispersión en los intervalos de confianza para los niveles analizados, se evidencia una diferencia significativa en los intervalos de confianza en el nivel 0(afluente) y el nivel 3 (efluente), así mismo las medias de cada uno de estos niveles son diferentes lo que indica es que estadísticamente son significativas, mientras que entre el nivel 1,2(muestras compuestas) y 3 los intervalos de confianza se sobreponen siendo significativas e implica un comportamiento similar.
- En la tabla de comparaciones múltiples se evidencia que el único nivel que no presenta diferencia significativa es en el nivel 2(compuesta) con sus demás interacciones entre los niveles con un valor de significancia mayor a 0,05 a diferencia de los demás niveles y sus interacciones que no presentan una tendencia constante menor o mayor al 0,05.
- En la prueba de subconjuntos se observan los niveles 1(compuesta),2(compuesta)y 3(efluente) en un mismo subconjunto no difiriendo de forma estadísticamente significativa con un valor de significancia 0,756 mayor al 0,05 , en comparación con el nivel 0(afluente) que se encuentra en diferente subconjunto con valor de significancia de 0,112 igualmente mayor al 0,05 , esta diferencia representa una significancia entre la muestra de DQO del afluente con respecto a las demás en la variable analizada del humedal 1

B. Variable: DBO.

Los datos experimentales de concentración para la variable DBO del humedal 1, fueron transformados a través de ln, para que el valor de p arrojara menor a 0,05 con la especie *Chrysopogon zizanioides*.

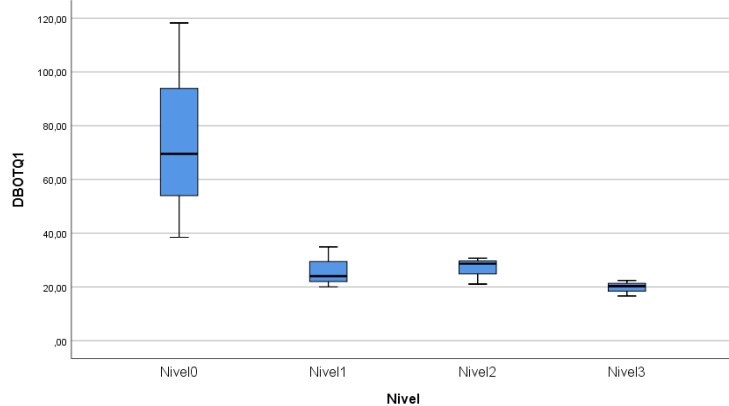
4.1.2.2 Validación de supuestos, análisis de varianza y comparaciones múltiples con presencia de la especie Chrysopogon zizanioides, para las variables DBO humedal 1.

Para la variable DBO, se realizaron los mismos análisis resumidos en la tabla 11, donde se presentan los resultados obtenidos para análisis mediante técnicas de experimentos.

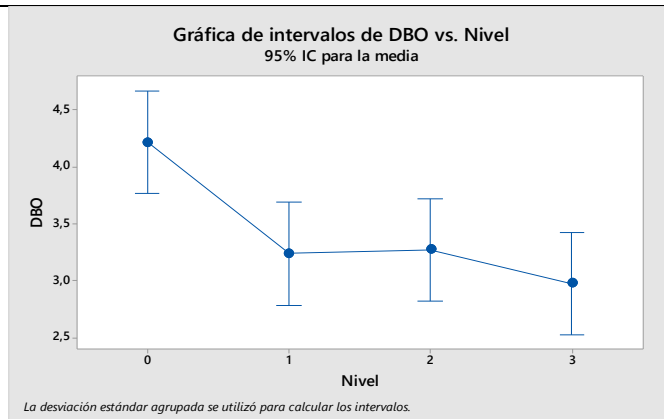
Tabla 11. Modelo DCA humedal 1-DBO.

| | | | | | | | |
|-------------------------------|--|-------------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------|---------|---------|
| VALIDACIÓN DE SUPUESTOS EN EL | Normalidad de los errores variable DBO en el humedal 1 | | | | | | |
| | Prueba de homocedasticidad humedal 1 DBO | Prueba de homogeneidad de varianzas | | | | | |
| | | DBOTQ1 | Se basa en la mediana | Estadístico de Levene | gl1 | gl2 | Sig. |
| | | | 2,487 | 3 | 8 | ,135 | |
| ANÁLISIS DE | Prueba de independencia de errores en el humedal 1 DBO | | | | | | |
| | Análisis de la varianza ANOVA Humedal 1 DBO | Fuente | GL | SC Ajust. | MC Ajust. | Valor F | Valor p |
| | Nivel | 3 | 2,6676 | 0,8892 | 7,77 | 0,009 | |
| | Error | 8 | 0,9155 | 0,1144 | | | |
| | Total | 11 | 3,5832 | | | | |

Diagrama de caja y bigotes para la variable DBO



Intervalos de DBO vs Nivel para el humedal 1



ANÁLISIS DE COMPARACIONES MÚLTIPLES EN EL HUMEDAL

Prueba de comparaciones múltiples a la variable DBO humedal 1

| Variable dependiente: DBOTQ1 | | | | | | |
|------------------------------|-----------|----------------------------|-------------|-------|-------------------------------|-----------------|
| HSD Tukey | | | | | | |
| (I) Nivel | (J) Nivel | Diferencia de medias (I-J) | Desv. Error | Sig. | Intervalo de confianza al 95% | |
| | | | | | Límite inferior | Límite superior |
| Nivel0 | Nivel1 | 49,09000 | 16,87959 | ,076 | -4,9644 | 103,1444 |
| | Nivel2 | 48,58333 | 16,87959 | ,079 | -5,4711 | 102,6377 |
| | Nivel3 | 55,62667* | 16,87959 | ,044 | 1,5723 | 109,6811 |
| Nivel1 | Nivel0 | -49,09000 | 16,87959 | ,076 | -103,1444 | 4,9644 |
| | Nivel2 | -,50667 | 16,87959 | 1,000 | -54,5611 | 53,5477 |
| | Nivel3 | 6,53667 | 16,87959 | ,979 | -47,5177 | 60,5911 |
| Nivel2 | Nivel0 | -48,58333 | 16,87959 | ,079 | -102,6377 | 5,4711 |
| | Nivel1 | ,50667 | 16,87959 | 1,000 | -53,5477 | 54,5611 |
| | Nivel3 | 7,04333 | 16,87959 | ,974 | -47,0111 | 61,0977 |
| Nivel3 | Nivel0 | -55,62667* | 16,87959 | ,044 | -109,6811 | -1,5723 |
| | Nivel1 | -6,53667 | 16,87959 | ,979 | -60,5911 | 47,5177 |
| | Nivel2 | -7,04333 | 16,87959 | ,974 | -61,0977 | 47,0111 |

Prueba de subconjuntos de comparaciones múltiples del humedal 1 DBO

| Nivel | N | Subconjunto para alfa = 0.05 | |
|---------|---|------------------------------|---------|
| | | 1 | 2 |
| Nivel 3 | 3 | 19,7667 | |
| Nivel1 | 3 | 26,3033 | 26,3033 |
| Nivel2 | 3 | 26,8100 | 26,8100 |
| Nivel0 | 3 | | 75,3933 |
| Sig. | | ,974 | ,076 |

Fuente: Autores

- En la grafica de la prueba de normalidad de los errores a traves de la prueba de kormogorov smirnov , donde el valor de p arrojó un valor de 0,150 mayor al 0,05 , por consiguiente H_0 no se rechaza , interpretandose que la Demanda quimica de oxigeno en el humedal 1 se comporta de forma normal en los diferentes niveles de muestreo llevados a cabo, la grafica tiende presentar asimetria con una tendencia de los puntos acercandose a la linea recta.
- La prueba de homogeneidad de varianzas se verificó con el software IBM SPSS statistics 15 obteniendo un valor de significancia de 0,135, interpretándose superior al 0.05, es decir la varianza en todos los niveles de muestreo tienden hacer iguales, tanto en el afluente, la muestra compuesta y el efluente, es decir cuentan con homocedasticidad constante.
- La independencia de los errores se determinó con el software Minitab 18 para la variable DBO en el humedal 1 y se observa que son al azar, en el cual no se observan tendencias crecientes, decrecientes y de forma de megáfono, representando que los errores se deben a un orden aleatorio y no cuentan con una y tendencia definida.
- El valor de P en el análisis de la varianza ANOVA arrojó un valor de 0,009 menor al 0,05 por ende el valor de F es significativo, el factor influye en la variable dependiente, por lo menos en dos niveles del factor, producen distintos efectos en la variable dependiente.

Un Análisis adicional de la varianza que se desarrolló fue gráficamente a través del diagrama de caja y bigotes, que representa las dispersiones en los diferentes niveles o puntos de muestreo en el humedal 1 con la variable DBO.

- En la gráfica de caja y bigotes, se observa que las dispersiones en los diferentes niveles de muestreo donde no se presenta diferencia significativa en la dispersión entre nivel 1 (muestra compuesta), nivel 2 (muestra compuesta) y el nivel 3(efluente), la diferencia significativa esta entre el nivel 0(afluente) y el nivel 3 (efluente), por el contenido de oxígeno consumido por los microorganismos en condiciones aeróbicas para la degradación de la materia orgánica oxidable y por el proceso de fitorremediación de la especie *Chrysopogon zizanioides* .
- En la gráfica de intervalos de DBO vs los niveles (puntos de muestreo), que evidencia la dispersión en los intervalos de confianza para los niveles analizados, se demuestra una diferencia significativa en los intervalos de confianza en el nivel 0(afluente) y el nivel 3 (efluente), con una mínima desviación en la media entre los niveles 1 y 2 de las (muestras compuestas), donde se sobreponen los intervalos de confianza representando que son significativas e implica un comportamiento similar.

- En la tabla de comparaciones múltiples, se evidencia que el único nivel que son significativas es en el nivel 0(afluente) con respecto al nivel 3(efluente) y viceversa arrojando un valor menor al 0,05 a diferencia de los demás niveles con sus interacciones que no son significativas arrojando un valor mayor a 0,05.
- En la tabla de subconjuntos, se observan los niveles 1(compuesta), 2(compuesta) en los dos subconjuntos no difiriendo de forma estadísticamente significativa, en comparación con el nivel 3 (efluente) y el nivel 0 (afluente) que se encuentran en un solo subconjunto cada uno representando una mayor significancia estadísticamente, los valores de significancia de ambos subconjuntos arrojan un valor mayor al 0,05.

HUMEDAL 2

4.1.3 Análisis mediante técnicas de diseño de experimentos

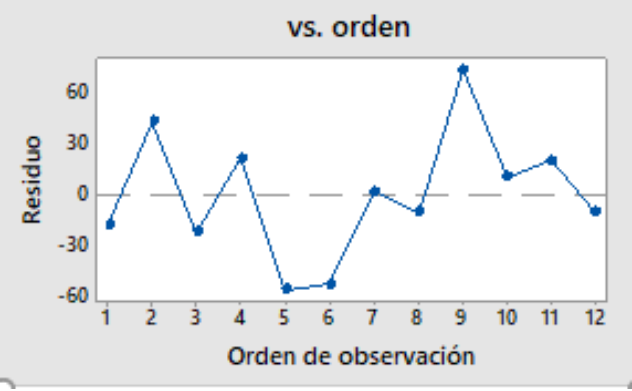
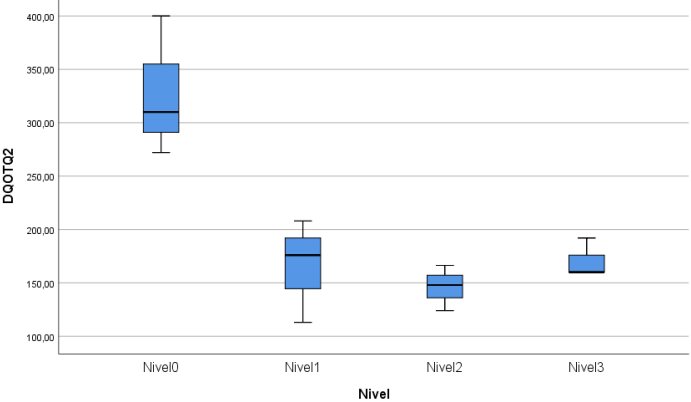
A. Variable: DQO

4.1.3.1 Validación de supuestos, análisis de varianza y comparaciones múltiples presencia de la especie *Chrysopogon zizanioides*, para las variables DQO humedal 2.

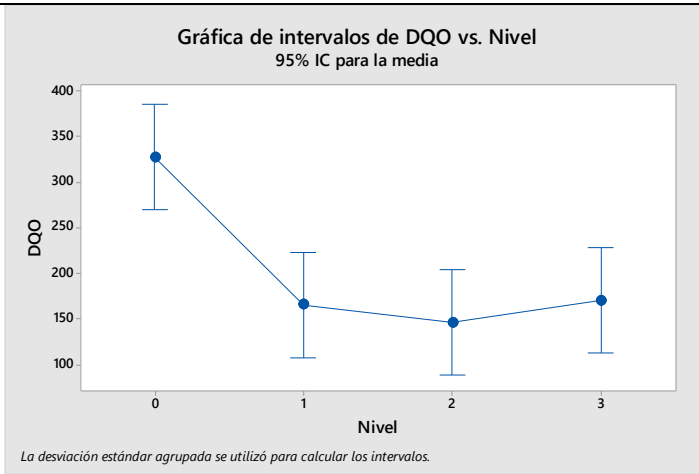
Para la variable DQO en el humedal 2, se realizaron los mismos análisis resumidos en la tabla 12, donde se presentan los resultados obtenidos para el análisis mediante técnicas de diseños de experimentos.

Tabla 12. Modelo DCA humedal 2-DQO.

| | | |
|-----------------------------------|---|--|
| VALIDACIÓN DE SUPUESTOS HUMEDAL 2 | Normalidad de los errores en el humedal 2-DQO | |
|-----------------------------------|---|--|

| | <p>Prueba de homocedasticidad en el humedal 2-DQO</p> | <p>Prueba de homogeneidad de varianzas</p> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------------------|---|---|------------------------------|------------------------------|------------|------------|-------------|--------------|----|-----------|-----------|---------|---------|-------|---|-------|-------|-------|-------|-------|---|-------|------|--|--|-------|----|-------|--|--|--|
| | <p>Prueba de independencia de errores en el humedal 2-DQO</p> | <p>DQOTQ2</p> | <p>Se basa en la mediana</p> | <p>Estadístico de Levene</p> | <p>gl1</p> | <p>gl2</p> | <p>Sig.</p> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | <p>0,770</p> | | | | <p>3</p> | <p>8</p> | <p>0,542</p> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <p>ANÁLISIS DE VARIANZA</p> | <p>Análisis de la varianza ANOVA Humedal 2-DQO</p> |  | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | <p>Diagrama de caja y bigotes para la variable DQO</p> | <table border="1" data-bbox="634 810 1292 1024"> <thead> <tr> <th>Fuente</th> <th>GL</th> <th>SC Ajust.</th> <th>MC Ajust.</th> <th>Valor F</th> <th>Valor p</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Nivel</td> <td>3</td> <td>63392</td> <td>21131</td> <td>11,34</td> <td>0,003</td> </tr> <tr> <td>Error</td> <td>8</td> <td>14902</td> <td>1863</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Total</td> <td>11</td> <td>78294</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>  | | | | | | Fuente | GL | SC Ajust. | MC Ajust. | Valor F | Valor p | Nivel | 3 | 63392 | 21131 | 11,34 | 0,003 | Error | 8 | 14902 | 1863 | | | Total | 11 | 78294 | | | |
| | Fuente | GL | SC Ajust. | MC Ajust. | Valor F | Valor p | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Nivel | 3 | 63392 | 21131 | 11,34 | 0,003 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Error | 8 | 14902 | 1863 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Total | 11 | 78294 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Intervalos de DQO vs Nivel para el humedal 2



ANÁLISIS DE COMPARACIONES MÚLTIPLES EN EL HUMEDAL ARTIFICIAL 2

prueba de comparaciones múltiples a la variable DQO

Variable dependiente: DQOTQ2

HSD Tukey

| (I) Nivel | (J) Nivel | Diferencia de medias (I-J) | Desv. Error | Sig. | Intervalo de confianza al 95% | |
|-----------|-----------|----------------------------|-------------|------|-------------------------------|-----------------|
| | | | | | Límite inferior | Límite superior |
| Nivel0 | Nivel1 | 161,66667* | 35,23978 | ,008 | 48,8165 | 274,5169 |
| | Nivel2 | 181,20000* | 35,23978 | ,004 | 68,3498 | 294,0502 |
| | Nivel3 | 156,66667* | 35,23978 | ,009 | 43,8165 | 269,5169 |
| Nivel1 | Nivel0 | -161,66667* | 35,23978 | ,008 | -274,5169 | -48,8165 |
| | Nivel2 | 19,53333 | 35,23978 | ,943 | -93,3169 | 132,3835 |
| | Nivel3 | -5,00000 | 35,23978 | ,999 | -117,8502 | 107,8502 |
| Nivel2 | Nivel0 | -181,20000* | 35,23978 | ,004 | -294,0502 | -68,3498 |
| | Nivel1 | -19,53333 | 35,23978 | ,943 | -132,3835 | 93,3169 |
| | Nivel3 | -24,53333 | 35,23978 | ,896 | -137,3835 | 88,3169 |
| Nivel3 | Nivel0 | -156,66667* | 35,23978 | ,009 | -269,5169 | -43,8165 |
| | Nivel1 | 5,00000 | 35,23978 | ,999 | -107,8502 | 117,8502 |
| | Nivel2 | 24,53333 | 35,23978 | ,896 | -88,3169 | 137,3835 |

*. La diferencia de medias es significativa en el nivel 0.05.

Prueba de subconjuntos de comparaciones múltiples del humedal 2-DQO

| Nivel | N | Subconjunto para alfa = 0.05 | |
|--------|---|------------------------------|----------|
| | | 1 | 2 |
| Nivel2 | 3 | 146,1333 | |
| Nivel1 | 3 | 165,6667 | |
| Nivel3 | 3 | 170,6667 | |
| Nivel0 | 3 | | 327,3333 |
| Sig. | | ,896 | 1,000 |

Fuente: Autores

- Al igual que para el humedal 1 se realizó la grafica de la prueba de normalidad de los errores, donde el valor de p arrojo un valor de 0,150 mayor al 0,05 , por consiguiente H_0 no se rechaza. El humedal 2 presenta una tendencia a linealidad igual que el humedal 1.
- Al igual que el humedal 1, en este humedal 2 se realizó la prueba de homogeneidad de varianzas obteniendo un valor de significancia de 0,542 analizando un comportamiento similar al humedal 1.
- En comparación con los resultados del humedal 1, en este humedal la independencia de los errores para la variable DQO en el humedal 2 y se observa que son al azar.
- El valor de P en el análisis de la varianza ANOVA para el humedal 2 obtuvo un valor de 0,003 menor al 0,05 por ende el valor de F es significativo.

Un Análisis adicional de la varianza que se llevó a cabo fue gráficamente que es el diagrama de caja y bigotes, que manifiesta las dispersiones en los diferentes niveles o puntos de muestreo en el humedal 2 con la variable DQO.

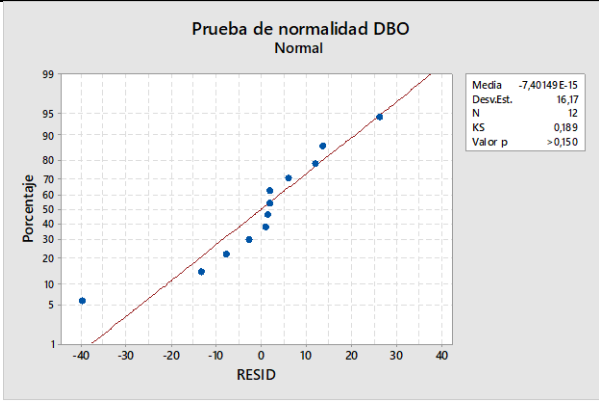
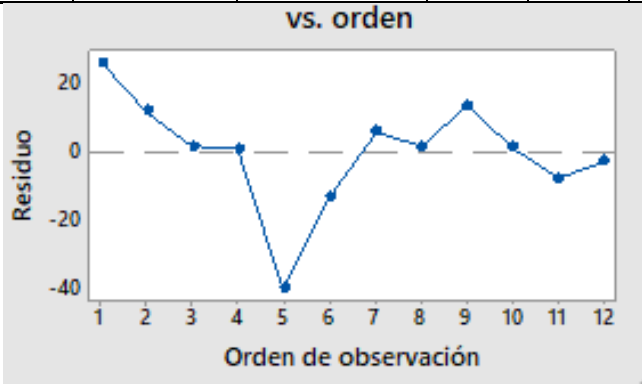
- El humedal 2 presenta el mismo comportamiento del humedal 1, en la gráfica de cajas y bigotes, esto se da por el contenido de materia orgánica difícilmente oxidable contenida en el agua residual que entrante al humedal 2, con respecto a la que sale después del tratamiento con la presencia de la especie *Chrysopogon zizanioides*.
- Para el humedal 2, la gráfica de intervalos de DQO vs los niveles (puntos de muestreo), se observa una diferencia significativa en los intervalos de confianza en el nivel 0(afluente) y el nivel 3 (efluente), al igual que en la media, expresando estadísticamente que no son significativas.
- Para el humedal 2, en la tabla de comparaciones múltiples, presenta una significancia en el nivel 0(afluente) con respecto a sus interacciones entre los niveles con un valor menor a 0,05, representando diferencia significativa.
- En la tabla de subconjuntos, se evidencian los niveles 1(compuesta), 2(compuesta) y 3 (efluente) en un mismo subconjunto no difiriendo de forma estadísticamente significativa, al igual que el nivel 0 (afluente) los valores de significancia de ambos subconjuntos arrojan un valor de significancia mayor al 0,05.

B. Variable: DBO

4.1.3.2 Validación de supuestos, análisis de varianza y comparaciones múltiples con presencia de la especie *Chrysopogon zizanioides*, para las variables DBO humedal 2.

Para la variable DBO, se realizaron los mismos análisis resumidos en la tabla 13, se dónde se presenta los resultados obtenidos para el análisis mediante técnicas de diseños de experimentos.

Tabla 13. Modelo DCA humedal 2-DBO.

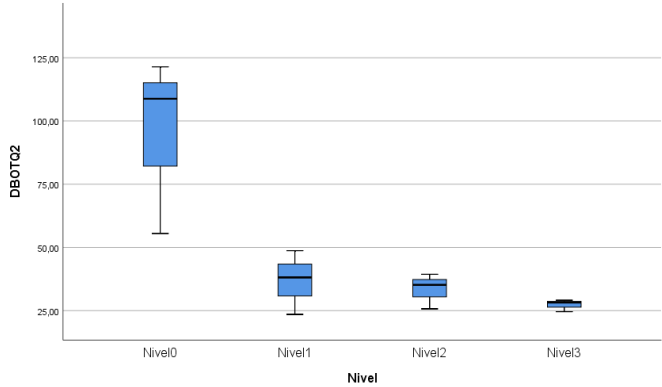
| VALIDACIÓN DE SUPUESTOS HUMEDAL 2 | Normalidad de los errores en el humedal 2 DBO |  | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|--|---|-----------------------|-----|------|------|--------|-----------------------|-----------------------|-----|-----|------|--|--|-------|---|---|------|
| | Prueba de homocedasticidad en el humedal 2 DBO | <p style="text-align: center;">Prueba de homogeneidad de varianzas</p> <table border="1" style="width: 100%; text-align: center;"> <thead> <tr> <th>DBOTQ2</th> <th>Se basa en la mediana</th> <th>Estadístico de Levene</th> <th>gl1</th> <th>gl2</th> <th>Sig.</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td></td> <td></td> <td>1,137</td> <td>3</td> <td>8</td> <td>,391</td> </tr> </tbody> </table> | | | | | DBOTQ2 | Se basa en la mediana | Estadístico de Levene | gl1 | gl2 | Sig. | | | 1,137 | 3 | 8 | ,391 |
| | DBOTQ2 | Se basa en la mediana | Estadístico de Levene | gl1 | gl2 | Sig. | | | | | | | | | | | | |
| | | 1,137 | 3 | 8 | ,391 | | | | | | | | | | | | | |
| Prueba de independencia de errores en el humedal 2 DBO |  | | | | | | | | | | | | | | | | | |

ANÁLISIS DE VARIANZA

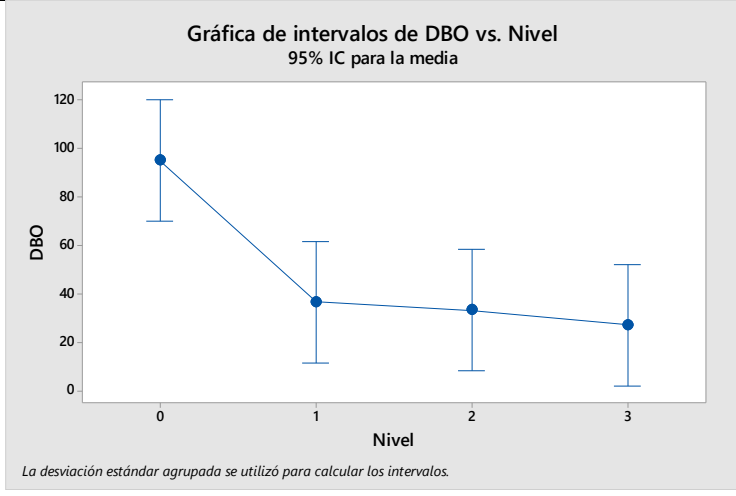
Análisis de la
varianza ANOVA
Humedal 2 DBO

| Fuente | GL | SC Ajust. | MC Ajust. | Valor F | Valor p |
|--------|----|-----------|-----------|---------|---------|
| Nivel | 3 | 8995 | 2998,3 | 8,34 | 0,008 |
| Error | 8 | 2878 | 359,7 | | |
| Total | 11 | 11872 | | | |

Diagrama de caja
y bigotes para la
variable DBO



Intervalos de DBO
vs Nivel para el
humedal 2



| | | | | | | | | |
|--|---|------------------------------|------------------------------|----------------------------|-------------|---------|-------------------------------|-----------------|
| ANÁLISIS DE COMPARACIONES MÚLTIPLES EN EL HUMEDAL 2 | prueba de comparaciones múltiples a la variable DBO para el humedal 2 | Variable dependiente: DBOTQ2 | | | | | | |
| | | HSD Tukey | | | | | | |
| | | (I) Nivel | (J) Nivel | Diferencia de medias (I-J) | Desv. Error | Sig. | Intervalo de confianza al 95% | |
| | | | | | | | Límite inferior | Límite superior |
| | | Nivel0 | Nivel1 | 58,46333* | 15,48542 | ,023 | 8,8736 | 108,0531 |
| | | | Nivel2 | 61,80333* | 15,48542 | ,017 | 12,2136 | 111,3931 |
| | | | Nivel3 | 67,94667* | 15,48542 | ,010 | 18,3569 | 117,5364 |
| | | Nivel1 | Nivel0 | -58,46333* | 15,48542 | ,023 | - | -8,8736 |
| | | | Nivel2 | 3,34000 | 15,48542 | ,996 | -46,2498 | 52,9298 |
| | | | Nivel3 | 9,48333 | 15,48542 | ,925 | -40,1064 | 59,0731 |
| | | Nivel2 | Nivel0 | -61,80333* | 15,48542 | ,017 | - | -12,2136 |
| | | | Nivel1 | -3,34000 | 15,48542 | ,996 | -52,9298 | 46,2498 |
| | | | Nivel3 | 6,14333 | 15,48542 | ,977 | -43,4464 | 55,7331 |
| | | Nivel3 | Nivel0 | -67,94667* | 15,48542 | ,010 | - | -18,3569 |
| | | | Nivel1 | -9,48333 | 15,48542 | ,925 | -59,0731 | 40,1064 |
| Nivel2 | -6,14333 | | 15,48542 | ,977 | -55,7331 | 43,4464 | | |
| Prueba de subconjuntos de comparaciones múltiples del humedal variable DBO humedal 2 | Nivel | N | Subconjunto para alfa = 0.05 | | | | | |
| | | | 1 | 2 | | | | |
| | Nivel 3 | 3 | 27,2867 | | | | | |
| | Nivel2 | 3 | 33,4300 | | | | | |
| | Nivel1 | 3 | 36,7700 | | | | | |
| | Nivel0 | 3 | | | 95,2333 | | | |
| Sig. | | | ,925 | 1,000 | | | | |

Fuente: Autores

- En el humedal 2, para la gráfica de normalidad de los errores, se evidencia un valor de p de 0.150 mayor al 0.05 por consiguiente H_0 no se rechaza.
- En el humedal 2 la prueba de homogeneidad de varianzas obtuvo un valor de significancia de 0.391 con respecto a la mediana interpretándose mayor al 0.05, es decir no cuentan con homocedasticidad, al igual que el humedal 1.
- El humedal 2 presentó un comportamiento igual al humedal 1 en cuanto a la independencia de los errores.
- Para el humedal 2, en comparación con el Humedal 1, el valor de P en el análisis de la varianza ANOVA dio como resultado 0,008 menor al 0,05 por ende el valor de F no es significativo, el factor no influye en la variable dependiente, por lo tanto, los distintos niveles del factor se comportan homogéneos en lo que la variable dependiente manifiesta.

Un Análisis complementario de la varianza que se realizó fue gráficamente, que es el diagrama de caja y bigotes, manifiesta las dispersiones en los diferentes niveles o puntos de muestreo en el humedal 2 con la variable DBO.

- Para el humedal 2 en la gráfica de caja y bigotes, se observa el mismo comportamiento que en el humedal 1. En este caso por el contenido de materia orgánica de la muestra de agua residual en los dos puntos de muestreo, la demanda bioquímica de oxígeno, indica la cantidad de oxígeno necesaria por el conjunto de microorganismos para estabilizar la materia orgánica presente.
- En el humedal 2, la gráfica de intervalos de DBO vs los niveles se evidencia los intervalos de confianza de los niveles 1 y 2 de las muestras compuestas presentan una mínima desviación en la media, donde se sobreponen los intervalos de confianza representando estadísticamente que son significativas.
- Para el humedal 2, en la tabla de comparaciones múltiples, se observa una significancia en el nivel 0 (afluente) con respecto a los demás niveles que se relaciona, siendo el único nivel con un valor menor a 0.05, por lo tanto, representa diferencia significativa.
- En la prueba de subconjuntos de comparaciones múltiples para la variable DBO en el humedal 2 se comportan de igual manera que el humedal 1, donde los niveles 1 (compuesta), 2 (compuesta) y 3 (efluente) están en un mismo subconjunto no difiriendo de forma estadísticamente significativa, los valores de significancia de ambos subconjuntos arrojan un valor mayor al 0,05.

HUMEDAL 3

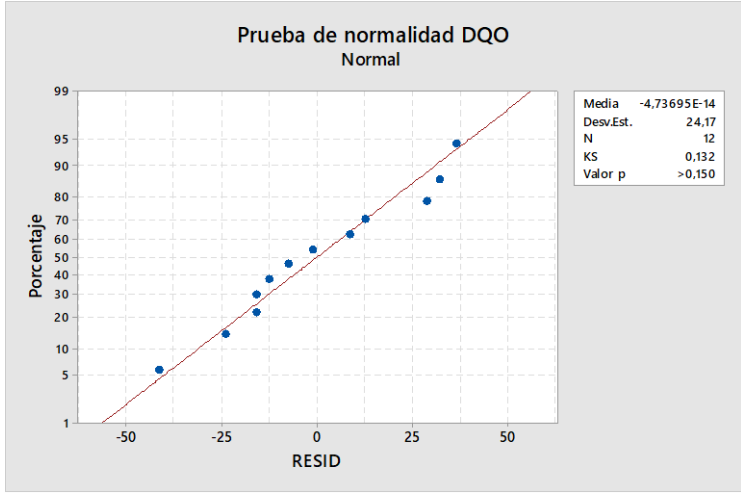
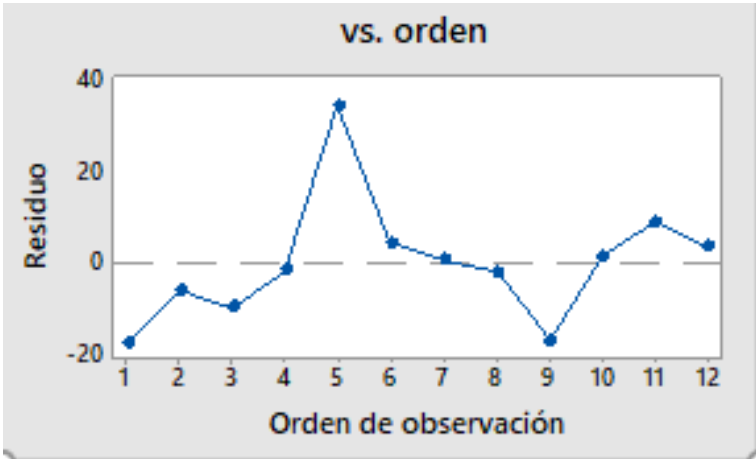
4.1.4 Análisis mediante técnicas de diseño de experimentos

A. Variable: DQO

*4.1.4.1 Validación de supuestos, análisis de varianza y comparaciones múltiples con presencia de la especie *Chrysopogon zizanioides* para la variable DQO humedal 3.*

Para la variable DQO en el humedal 3, se realizaron los mismos análisis resumidos en la tabla 14, donde se presentan los resultados obtenidos para el análisis mediante técnicas de diseños de experimentos.

Tabla 14. Modelo DCA humedal 3-DQO.

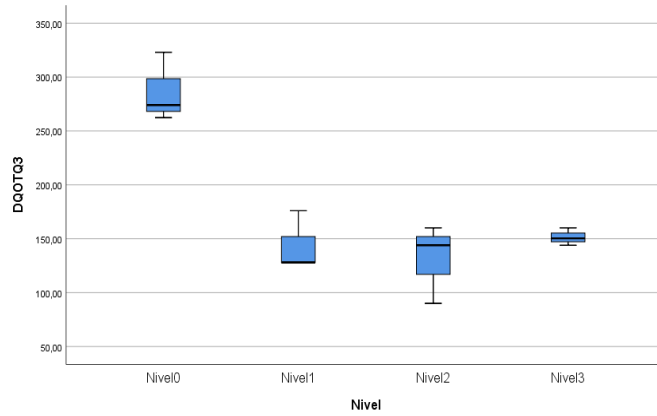
| VALIDACIÓN DE SUPUESTOS EN EL HUMEDAL 3 | Normalidad de los errores en el humedal 3-DQO |  | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|--|--|-------------------------------------|-----|------|--|--|--|--------|-----------------------|-----------------------|-----|-----|------|--|--|------|---|---|------|
| | Prueba de homocedasticidad variable DQO en humedal 3 | <table border="1" style="width: 100%; text-align: center;"> <thead> <tr> <th colspan="6">Prueba de homogeneidad de varianzas</th> </tr> <tr> <th>DQOTQ3</th> <th>Se basa en la mediana</th> <th>Estadístico de Levene</th> <th>gl1</th> <th>gl2</th> <th>Sig.</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td></td> <td></td> <td>,334</td> <td>3</td> <td>8</td> <td>,801</td> </tr> </tbody> </table> | Prueba de homogeneidad de varianzas | | | | | | DQOTQ3 | Se basa en la mediana | Estadístico de Levene | gl1 | gl2 | Sig. | | | ,334 | 3 | 8 | ,801 |
| | Prueba de homogeneidad de varianzas | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| DQOTQ3 | Se basa en la mediana | Estadístico de Levene | gl1 | gl2 | Sig. | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | ,334 | 3 | 8 | ,801 | | | | | | | | | | | | | | | |
| Prueba de independencia de errores variable DQO humedal 3 |  | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

ANÁLISIS DE VARIANZA

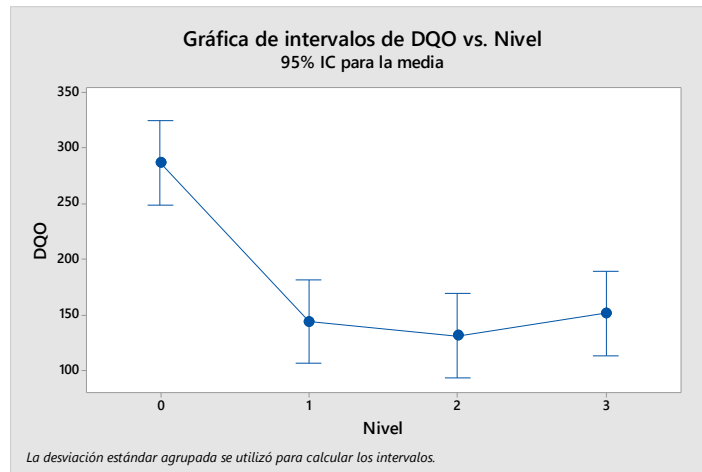
Análisis de la
varianza ANOVA
variable DQO
humedal 3

| Fuente | GL | SC Ajust. | MC Ajust. | Valor F | Valor p |
|--------|----|-----------|-----------|---------|---------|
| Nivel | 3 | 47407 | 15802,4 | 19,67 | 0,000 |
| Error | 8 | 6426 | 803,2 | | |
| Total | 11 | 53833 | | | |

Diagrama de caja y
bigotes para la
variable DQO
humedal 3



Intervalos de DQO
vs Nivel humedal
3



| ANÁLISIS DE COMPARACIONES MÚLTIPLES EN EL HUMEDAL ARTIFICIAL 3 | | Variable dependiente: DQOTQ3 | | | | | |
|--|--------|------------------------------|------------------------------|----------------------------|-----------------|-----------------|-------------------------------|
| | | HSD Tukey | | | | | |
| | | (I) Nivel | (J) Nivel | Diferencia de medias (I-J) | Desv. Error | Sig. | Intervalo de confianza al 95% |
| | | | | | Límite inferior | Límite superior | |
| prueba de comparaciones múltiples variable DQO humedal 3. | Nivel0 | Nivel1 | 142,46667* | 23,14030 | ,001 | 68,3633 | 216,5700 |
| | | Nivel2 | 155,13333* | 23,14030 | ,001 | 81,0300 | 229,2367 |
| | | Nivel3 | 135,00000* | 23,14030 | ,002 | 60,8966 | 209,1034 |
| | Nivel1 | Nivel0 | - 142,46667* | 23,14030 | ,001 | - 216,5700 | -68,3633 |
| | | Nivel2 | 12,66667 | 23,14030 | ,945 | -61,4367 | 86,7700 |
| | | Nivel3 | -7,46667 | 23,14030 | ,988 | -81,5700 | 66,6367 |
| | Nivel2 | Nivel0 | - 155,13333* | 23,14030 | ,001 | - 229,2367 | -81,0300 |
| | | Nivel1 | -12,66667 | 23,14030 | ,945 | -86,7700 | 61,4367 |
| | | Nivel3 | -20,13333 | 23,14030 | ,820 | -94,2367 | 53,9700 |
| | Nivel3 | Nivel0 | - 135,00000* | 23,14030 | ,002 | - 209,1034 | -60,8966 |
| | | Nivel1 | 7,46667 | 23,14030 | ,988 | -66,6367 | 81,5700 |
| | | Nivel2 | 20,13333 | 23,14030 | ,820 | -53,9700 | 94,2367 |
| *. La diferencia de medias es significativa en el nivel 0.05. | | | | | | | |
| Prueba de subconjuntos de comparaciones múltiples variable DQO humedal 3 | Nivel | N | Subconjunto para alfa = 0.05 | | | | |
| | | | 1 | 2 | | | |
| | Nivel2 | 3 | 131,3333 | | | | |
| | Nivel1 | 3 | 144,0000 | | | | |
| | Nivel3 | 3 | 151,4667 | | | | |
| | Nivel0 | 3 | | 286,4667 | | | |
| | Sig. | | | ,820 | 1,000 | | |

Fuente: Autores

- Al igual que para el humedal 1 se realizó la grafica de la prueba de normalidad de los errores para los humedales 2 y 3, donde el valor de p arrojó un valor de 0.150 mayor al 0.05, por consiguiente H_0 no se rechaza. En el humedal 2 y 3 presenta una tendencia a linealidad igual que el humedal 1.
- En los humedales 2 y 3, se realizó la prueba de homogeneidad de varianzas obteniendo un valor de significancia de 0.542 y 0.801 analizando un comportamiento similar al humedal 1, teniendo en cuenta el valor de significancia que es de mayor al 0.05.
- Los resultados son iguales para el humedal 1, 2 y 3 en la independencia de los errores para la variable DQO y se observa que son al azar.

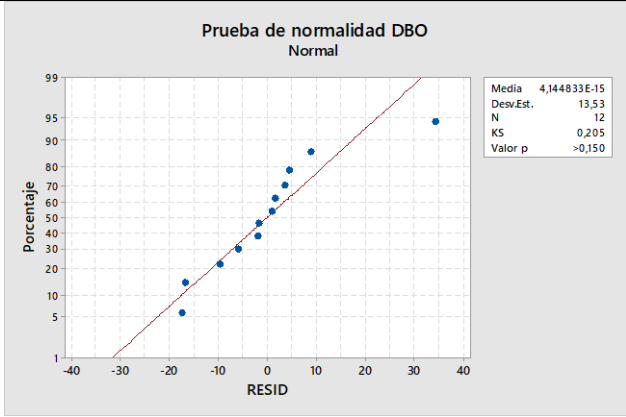
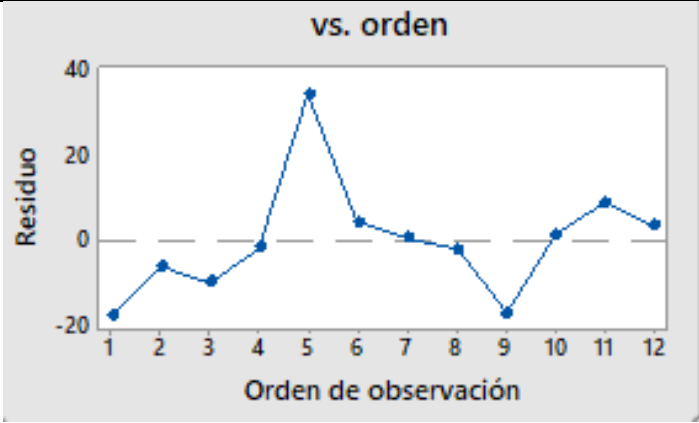
- El valor de P en el análisis de la varianza ANOVA para el humedal 2 obtuvo un valor de 0,003 y para el Humedal 3, se obtuvo un valor menor al 0,05 por ende el valor de F es significativo.
- En el humedal 3, la gráfica de caja y bigote, se observan las dispersiones de los diferentes niveles de muestreo llevados a cabo en la investigación, donde hay mayor dispersión entre el nivel 0(afluente) con el nivel 3(efluente), por la diferencia de materia orgánica presente en el agua residual que llega de la vivienda al humedal sin tratamiento con respecto a la que sale del humedal después del tratamiento, gracias a la especie *Chrysopogon zizanioides* y al conjunto de microfauna y microbiota presente en el humedal.
- Para el humedal 3, en la gráfica de los intervalos de confianza en cada uno de los niveles de muestreo, donde la diferencia en la media de cada nivel es evidente, por lo tanto, no hay superposición entre los niveles.
- Para el humedal 3, la tabla de comparaciones múltiples se evidencia que hay diferencia significativa en el nivel 0 con los demás niveles, es el único nivel que presenta un valor de significancia menor a 0.05 con sus demás interacciones entre los niveles.
- En la prueba de subconjuntos de comparaciones múltiples para la variable DQO en el humedal 3 evidencia que los niveles 1 (compuesta), 2 (compuesta) y 3 (efluente) están en un mismo subconjunto no difiriendo de forma estadísticamente significativa, los valores de significancia de ambos subconjuntos arrojan un valor mayor al 0,05.

B. Variable: DBO

*4.1.4.2 Validación de supuestos, análisis de varianza y comparaciones múltiples con presencia de la especie *Chrysopogon zizanioides* para la variable DBO humedal 3.*

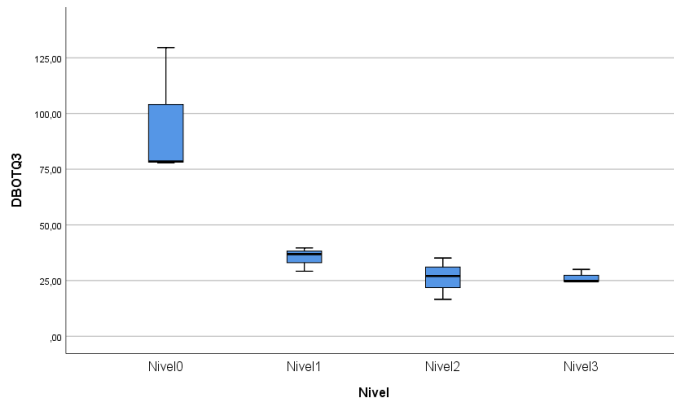
Para la variable DBO, se realizaron los mismos análisis resumidos en la tabla 15, se dónde se presenta los resultados obtenidos para el análisis mediante técnicas de diseños de experimentos.

Tabla 15. Modelo DCA humedal 3-DBO.

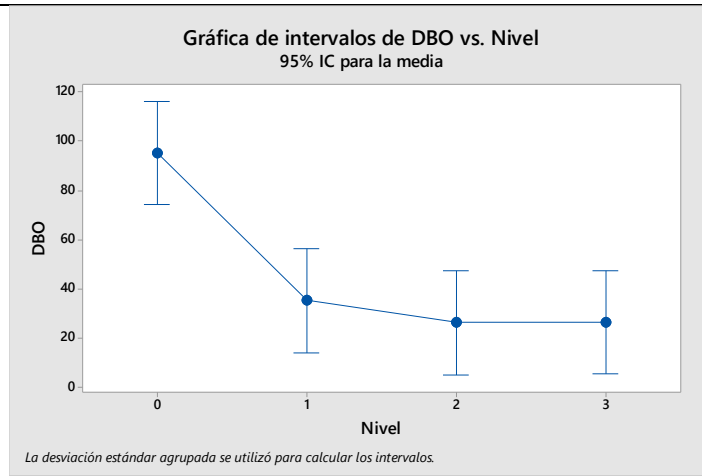
| VALIDACIÓN DE SUPUESTOS EN EL HUMEDAL 3 | Normalidad de los errores variable DBO humedal 3 |  | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|--|-----------------------|---------|-----------|-----------|---------|---------|-----------------------|-----------------------|------|--------|-------|-------|-------|------|------|-------|------|--|-------|----|-------|--|--|--|--|--|--|--|
| | Prueba de homocedasticidad variable DBO humedal 3 | <p style="text-align: center;">Prueba de homogeneidad de varianzas</p> <table border="1"> <tr> <td>DBOTQ3</td> <td>Se basa en la mediana</td> <td>Estadístico de Levene</td> <td>gl1</td> <td>gl2</td> <td>Sig.</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>,631</td> <td>3</td> <td>8</td> <td>,615</td> </tr> </table> | | | | | | DBOTQ3 | Se basa en la mediana | Estadístico de Levene | gl1 | gl2 | Sig. | | | ,631 | 3 | 8 | ,615 | | | | | | | | | | | |
| | DBOTQ3 | Se basa en la mediana | Estadístico de Levene | gl1 | gl2 | Sig. | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | ,631 | 3 | 8 | ,615 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Prueba de independencia de errores variable DBO humedal 3 |  | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Análisis de la varianza ANOVA variable DBO humedal 3 | <table border="1"> <thead> <tr> <th>Fuente</th> <th>GL</th> <th>SC Ajust.</th> <th>MC Ajust.</th> <th>Valor F</th> <th>Valor p</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Nivel</td> <td>3</td> <td>9963</td> <td>3321,0</td> <td>13,20</td> <td>0,002</td> </tr> <tr> <td>Error</td> <td>8</td> <td>2013</td> <td>251,6</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Total</td> <td>11</td> <td>11976</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> | Fuente | GL | SC Ajust. | MC Ajust. | Valor F | Valor p | Nivel | 3 | 9963 | 3321,0 | 13,20 | 0,002 | Error | 8 | 2013 | 251,6 | | | Total | 11 | 11976 | | | | | | | |
| Fuente | GL | SC Ajust. | MC Ajust. | Valor F | Valor p | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Nivel | 3 | 9963 | 3321,0 | 13,20 | 0,002 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Error | 8 | 2013 | 251,6 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Total | 11 | 11976 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

ANÁLISIS DE VARIANZA

Diagrama de caja y bigotes variable DBO humedal 3



Intervalos de DBO vs Nivel humedal 3



ANÁLISIS DE COMPARACIONES MÚLTIPLES EN EL HUMEDAL ARTIFICIAL 2

Prueba de comparaciones variable DBO, humedal 3

| Variable dependiente: DBOTQ3 | | | | | | |
|------------------------------|-----------|----------------------------|-------------|-------|-------------------------------|-----------------|
| HSD Tukey | | | | | | |
| (I) Nivel | (J) Nivel | Diferencia de medias (I-J) | Desv. Error | Sig. | Intervalo de confianza al 95% | |
| | | | | | Límite inferior | Límite superior |
| Nivel0 | Nivel1 | 60,08667* | 12,95023 | ,007 | 18,6155 | 101,5579 |
| | Nivel2 | 69,07000* | 12,95023 | ,003 | 27,5988 | 110,5412 |
| | Nivel3 | 68,88333* | 12,95023 | ,003 | 27,4121 | 110,3545 |
| Nivel1 | Nivel0 | -60,08667* | 12,95023 | ,007 | - | -18,6155 |
| | Nivel2 | 8,98333 | 12,95023 | ,897 | -32,4879 | 50,4545 |
| | Nivel3 | 8,79667 | 12,95023 | ,902 | -32,6745 | 50,2679 |
| Nivel2 | Nivel0 | -69,07000* | 12,95023 | ,003 | - | -27,5988 |
| | Nivel1 | -8,98333 | 12,95023 | ,897 | -50,4545 | 32,4879 |
| | Nivel3 | -,18667 | 12,95023 | 1,000 | -41,6579 | 41,2845 |
| Nivel3 | Nivel0 | -68,88333* | 12,95023 | ,003 | - | -27,4121 |
| | Nivel1 | -8,79667 | 12,95023 | ,902 | -50,2679 | 32,6745 |
| | Nivel2 | ,18667 | 12,95023 | 1,000 | -41,2845 | 41,6579 |

| | Prueba de subconjuntos de comparaciones múltiples variable DBO humedal 3 | Nivel | N | Subconjunto para alfa = 0.05 | |
|--|--|---------|---|------------------------------|---------|
| | | | | 1 | 2 |
| | | Nivel 2 | 3 | 26,2533 | |
| | | Nivel3 | 3 | 26,4406 | |
| | | Nivel1 | 3 | 35,2367 | |
| | | Nivel0 | 3 | | 95,3233 |
| | | Sig. | | ,897 | 1,000 |

Fuente: Autores

- La prueba de normalidad de los errores, el valor de p arroja un valor de 0,150 mayor al % 5 , por consiguiente H_0 no se rechaza. El humedal 3 se presenta de forma normal en los diferentes niveles de muestreo llevados a cabo y los puntos tienden a formar una línea recta.
- En la prueba de homogeneidad de varianzas obteniendo un valor de significancia de 0,615 con respecto a la mediana interpretándose mayor al 0,05, es decir la varianza en todos los niveles o puntos de muestreo tienden hacer homogéneas, es decir no cuentan con homocedasticidad.
- La independencia de los errores se observa que son aleatorios. En el cual no se presentan tendencias ascendentes, descendentes o de megáfono indicando que los errores que se generan obedecen a un orden aleatorio.
- En el análisis de varianza, el valor de significancia da menor al 0,05 con un valor de 0,002, es decir no es significativa y por lo tanto el factor no repercute en la variable dependiente, los diferentes niveles del factor se comportan de igual forma en lo que a la varianza dependiente se refiere.
- En la gráfica de caja y bigotes se observan las dispersiones de los diferentes niveles o puntos de muestreo, evidenciándose las diferencias entre las dispersiones más notorias que son entre el nivel 0(afluente) y el nivel 3 (efluente) durante los tres ciclos de muestreo.
- En la gráfica de intervalos de confianza, se evidencia la misma diferencia significativa entre los intervalos de confianza de los niveles 0(afluente) y el nivel 3(efluente) que se presentó en los demás humedales con las dos variables analizadas (DQO y DBO) en cada uno, pero en este se presenta otra diferencia particular, donde las medias del nivel 2(compuesta) y el nivel 3(efluente) son iguales y los intervalos de confianza de superponen.
- Para el humedal 3, en la tabla de comparaciones múltiples, se presentó un nivel de significancia en el nivel 0 (afluente) con los demás niveles, con un valor de significancia menor a 0,05.

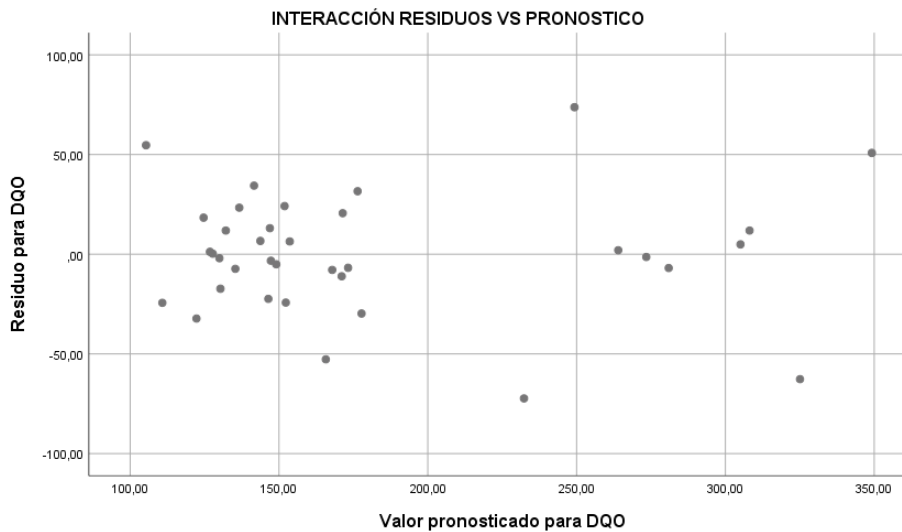
- La prueba de subconjuntos se evidencia que los niveles 1(compuesta),2(compuesta) y 3 (efluente) están en un mismo subconjunto no difiriendo de forma estadísticamente significativa, en comparación con el nivel 0 que se encuentra en diferente subconjunto los valores de significancia de ambos subconjuntos arrojan un valor mayor a 0,0

4.1.5 Análisis del modelo DBCA para las variables DQO y DBO en los humedales artificiales tipo batch con presencia de la especie *Chrysopogon zizanioides*

A. VARIABLE: DQO

Para revisar la interacción entre los datos experimentales de la variable DQO, de los humedales artificiales y sus puntos de muestreo se analizó mediante el gráfico de interacción de los residuos vs el valor pronosticado de la variable de interés, como se muestra en la gráfica 1.

Gráfica 1. Interacción de los residuos vs pronóstico de la variable DQO en los humedales artificiales con presencia de la especie *Chrysopogon zizanioides*.



Fuente: Autores

En la gráfica 1 se observa la ausencia de interacción entre los humedales artificiales y los puntos de muestreo con respecto a la variable DQO porque en el gráfico de dispersión no se presenta ninguna tendencia curvilínea, una relación directa o indirectamente proporcional en los datos experimentales.

En la tabla 16, se presenta la validación de supuestos, análisis de varianza, prueba de efectos entre los componentes y comparaciones múltiples para la variable DQO.

Tabla 16. Modelo DBCA variable DQO.

| VALIDACIÓN DE SUPUESTOS | Prueba de homocedasticidad variable DQO | Prueba de homogeneidad de varianzas | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|--|---|--------------------------------------|-----------------------|----------------------------|------------|-------------|----------------------------|-----------------|-----------|-----------|---------|---------|---------|----|--------|-------|------|-------|--------------|---|-------|------|------|-------|-------|----|-------|------|--|--|-------|----|--------|--|--|--|
| | | DQO | Se basa en la mediana | Estadístico de Levene | gl1 | gl2 | Sig. | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | ,834 | 11 | 24 | ,610 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ANÁLISIS DE VARIANZA | Análisis de la varianza ANOVA varianza DQO | <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="background-color: #d9ead3;">Fuente</th> <th style="background-color: #d9ead3;">GL</th> <th style="background-color: #d9ead3;">SC Ajust.</th> <th style="background-color: #d9ead3;">MC Ajust.</th> <th style="background-color: #d9ead3;">Valor F</th> <th style="background-color: #d9ead3;">Valor p</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Bloques</td> <td>11</td> <td>148314</td> <td>13483</td> <td>9,31</td> <td>0,000</td> </tr> <tr> <td>Tratamientos</td> <td>2</td> <td>10230</td> <td>5115</td> <td>3,53</td> <td>0,047</td> </tr> <tr> <td>Error</td> <td>22</td> <td>31869</td> <td>1449</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Total</td> <td>35</td> <td>190414</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> | | | | | | Fuente | GL | SC Ajust. | MC Ajust. | Valor F | Valor p | Bloques | 11 | 148314 | 13483 | 9,31 | 0,000 | Tratamientos | 2 | 10230 | 5115 | 3,53 | 0,047 | Error | 22 | 31869 | 1449 | | | Total | 35 | 190414 | | | |
| | | Fuente | GL | SC Ajust. | MC Ajust. | Valor F | Valor p | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | Bloques | 11 | 148314 | 13483 | 9,31 | 0,000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | Tratamientos | 2 | 10230 | 5115 | 3,53 | 0,047 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | Error | 22 | 31869 | 1449 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Total | 35 | 190414 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| PRUEBA DE EFECTOS ENTRE LOS COMPONENTES | Prueba de efectos Inter sujetos variable DQO | Pruebas de efectos inter-sujetos | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | Variable dependiente: DQO | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | Origen | Tipo III de suma de cuadrados | gl | Media cuadrática | F | Sig. | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | Pmuestreo | 148314,409 | 11 | 13483,128 | 9,308 | ,000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | Humedal | 10230,242 | 2 | 5115,121 | 3,531 | ,047 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Error | 31868,984 | 22 | 1448,590 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| PRUEBA DE COMPARACIONES MULTIPLES | Prueba de comparaciones múltiples variable DQO | Comparaciones múltiples | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | Variable dependiente: DQO | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | (I) Tanque | (J) Tanque | Diferencia de medias (I-J) | Error tip. | Sig. | Intervalo de confianza 95% | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | Límite inferior | Límite superior | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | DMS | 1 | 2 | -41,0833* | 15,53807 | ,015 | - | -8,8593 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | 3 | -16,9500 | 15,53807 | ,287 | - | 15,2740 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | 2 | 1 | 41,0833* | 15,53807 | ,015 | 8,8593 | 73,3073 | 73,3073 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | 3 | 24,1333 | 15,53807 | ,135 | -8,0907 | 56,3573 | 56,3573 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | 3 | 1 | 16,9500 | 15,53807 | ,287 | - | 15,2740 | 49,1740 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | 2 | -24,1333 | 15,53807 | ,135 | - | 56,3573 | 8,0907 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Fuente: Autores

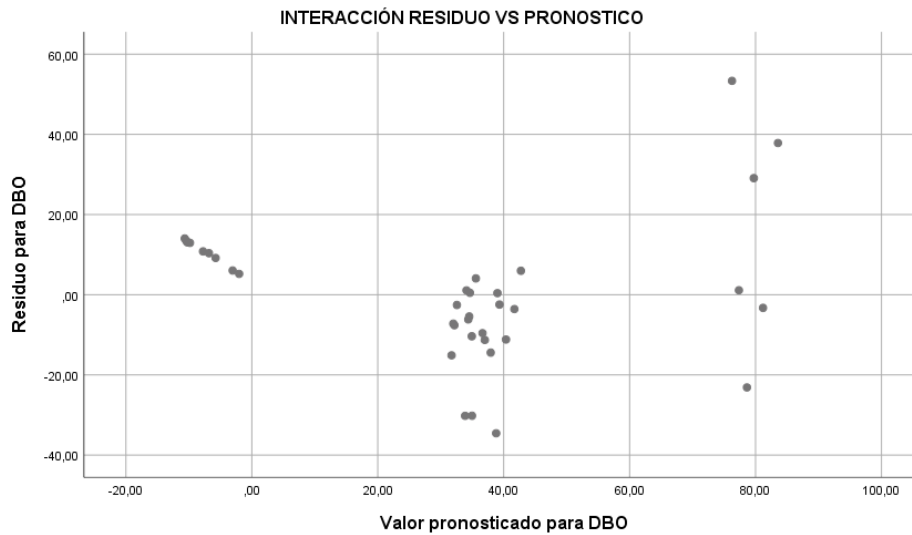
- En la prueba de homogeneidad el valor de significancia para la variable DQO en los humedales artificiales fue de 0,610 por lo tanto, no presentan diferencia significativa y no cuentan con homocedasticidad.
- En el análisis de varianza, se observa el análisis de la varianza para los bloques, donde los puntos de muestreo arrojaron un valor P de 0 siendo menor al 0,05 lo que indica que el valor de F es significativo, de igual manera, en el análisis de los tratamientos se refleja que los humedales son completamente distintos, ya que su valor p de 0,047 es menor al 0.05.
- En la prueba de efectos entre los componentes, el Pmuestreo y el humedal ambos tienen un valor menor al 0,05 en el nivel crítico Sig, se rechaza la hipótesis que la variable se comporta igual en todos los niveles o puntos de muestreo y así mismo en todos los humedales por lo tanto la media global F es significativamente distinta de 0 y 0,047.
- En la prueba de comparaciones múltiples de la variable DQO, presenta diferencia significativa entre el humedal 1 y 2 arrojando el valor de sig 0.015 menor a 0.05 a diferencia de los demás humedales artificiales donde el valor de significancia es mayor a 0.05 expresando poca diferencia significativa entre ellos, para saber que humedal es el más eficiente en remover materia orgánica en términos de la variable DBO se comparó con el porcentaje de remoción, arrojando un porcentaje de remoción del humedal 1 para los tres ciclos evaluados fue de 45.84% y el humedal 2 para los mismos ciclos con un porcentaje de remoción de 46.41%, siendo más eficiente el humedal 2.

B. VARIABLE: DBO

El análisis por el DBCA que se realizó para la variable DQO igualmente se llevó a cabo para la variable DBO, con los datos experimentales de los humedales artificiales con la presencia de la especie *Chryzopogon zizanioides*.

Para revisar la interacción entre los datos experimentales de la variable DBO, de los humedales artificiales y sus puntos de muestreo se analizó mediante el gráfico de interacción de los residuos vs el valor pronosticado de la variable de interés, como se muestra en la gráfica 2.

Gráfica 2. Interacción de los residuos vs el valor pronosticado de la variable DBO para los humedales artificiales con la especie *Chryzopogon zizanioides*.



Fuente: Autores

En la tabla 17, se presenta la validación de supuestos, análisis de varianza, prueba de efectos entre los componentes y comparaciones múltiples para la variable DBO.

Tabla 17. Modelo DBCA variable DBO.

| | | | | | | | |
|--------------------------------|-----------------------------------|--|-----------------------|-----------------------|-----------|---------|---------|
| VALIDACIÓN DE SUPUESTOS | Prueba de homocedasticidad -DBO | Prueba de homogeneidad de varianzas | | | | | |
| | | DBO | Se basa en la mediana | Estadístico de Levene | gl1 | gl2 | Sig. |
| | | | | 1,041 | 11 | 24 | ,444 |
| ANÁLISIS DE VARIANZA | Análisis de la varianza ANOVA-DBO | Fuente | GL | SC Ajust. | MC Ajust. | Valor F | Valor p |
| | | Bloques | 11 | 12931 | 1175,5 | 2,37 | 0,041 |
| | | Tratamientos | 2 | 15219 | 7609,6 | 15,33 | 0,000 |
| | | Error | 22 | 10921 | 496,4 | | |
| | | Total | 35 | 39071 | | | |

| | | | | | | | | | |
|--|---------------------------------------|---|--------------------------------------|---------------|----------------------------|------------|-------------|----------------------------|-----------------|
| PRUEBA DE EFECTOS ENTRE LOS COMPONENTES | Prueba de efectos Inter-sujetos-DBO | Pruebas de efectos inter-sujetos | | | | | | | |
| | | Variable dependiente: DQO | | | | | | | |
| | | Origen | Tipo III de suma de cuadrados | gl | Media cuadrática | F | Sig. | | |
| | | Pmuestreo | 12930,727 | 11 | 1175,521 | 2,368 | ,041 | | |
| | | Humedal | 15219,204 | 2 | 7609,602 | 15,329 | ,000 | | |
| Error | 10920,906 | 22 | 496,405 | | | | | | |
| PRUEBA DE COMPARACIONES MULTIPLES | Prueba de comparaciones multiples DBO | Comparaciones múltiples | | | | | | | |
| | | Variable dependiente: DBO | | | | | | | |
| | | | (I) Tanque | (J) Tanque | Diferencia de medias (I-J) | Error tip. | Sig. | Intervalo de confianza 95% | |
| | | | | | | | | Límite inferior | Límite superior |
| | | DMS | 1 | 2 | -,2861* | ,12195 | ,028 | -,5390 | -,0332 |
| | | | | 3 | -,2145 | ,12195 | ,093 | -,4674 | ,0384 |
| | | 2 | 3 | 1 | ,2861* | ,12195 | ,028 | ,0332 | ,5390 |
| | | | | 2 | ,0716 | ,12195 | ,563 | -,1813 | ,3245 |
| | | 3 | 1 | 2 | ,2145 | ,12195 | ,093 | -,0384 | ,4674 |
| | | | | 3 | -,0716 | ,12195 | ,563 | -,3245 | ,1813 |

Fuente: Autores

- En la prueba de homogeneidad, el valor de significancia fue de 0,444, por lo tanto, no presentan diferencia significativa y no cuentan con homocedasticidad.
- El análisis de la varianza para los bloques (puntos de muestreo) donde arrojo un valor P de 0,041 siendo menor al 0,05 lo que representa que el valor de F no es significativo y la DQO en los diferentes puntos de muestreo se comporta diferente, al igual que en los tratamientos(humedales) la variable respuesta es desigual con un valor de P de 0 menor al 0,05.
- En la prueba de efectos entre los componentes, el Pmuestreo y el humedal tienen un valor menor al 0,05 en el nivel crítico Sig, se rechaza la hipótesis que la demanda Bioquímica de oxígeno es constante en todos los tres humedales artificiales tipo batch y así mismo en todos sus puntos de muestreo, por consiguiente, la media global F es significativamente diferente de 0,041 y 0.
- En la prueba de comparaciones múltiples, presenta diferencia significativa entre el humedal 1 y 2 arrojando el valor de sig 0.028 menor a 0.05 a diferencia de los demás humedales artificiales donde el valor de significancia es mayor a 0.05 expresando poca diferencia significativa entre

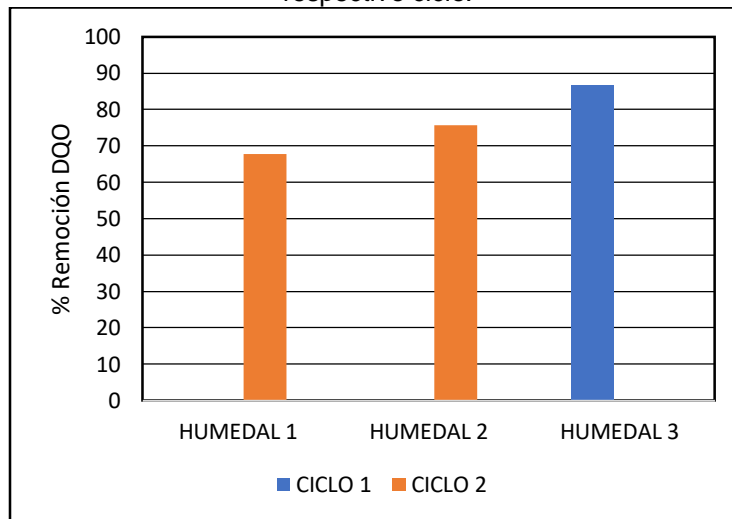
ellos, para saber que humedal es el más eficiente en remover materia orgánica en términos de la variable DBO se comparó con el porcentaje de remoción, arrojando un porcentaje de remoción del humedal 1 para los tres ciclos evaluados fue de 28.94% y el humedal 2 para los mismos ciclos con un porcentaje de remoción de 67.25%, siendo más eficiente el humedal 2.

4.1.6 Análisis de porcentaje de remoción en los humedales artificiales

A. DQO EN LA REMOCION DE HUMEDALES

Esta propiedad fisicoquímica determina la cantidad de oxígeno que se necesita para oxidar químicamente el material orgánico biodegradable y no biodegradable en las aguas residuales provenientes de la vivienda rural. (24)

Gráfica 3. Porcentaje de remoción de DQO sin la especie *Chryzopogon zizanioides* con su respectivo ciclo.



Fuente: Autores

En la gráfica anterior durante los ciclos que presentaron remoción de materia orgánica biodegradable y no biodegradable en los humedales artificiales tipo batch se debe al metabolismo de los microorganismos heterótrofos que se adaptan a condiciones aerobias y anaerobias, usando los compuestos orgánicos del agua para la generación de biomasa. (25)

En los ciclos donde no se presenta remoción de DQO se debe a que ciertas sustancias inorgánicas como sulfuros, sulfatos, tiosulfatos, nitritos y el ion ferroso son oxidadas por el dicromato, formando una DQO inorgánica, arrojando un valor incorrecto de DQO, cuando esta se mide como el contenido de materia orgánica en el agua residual, además los compuestos orgánicos que son oxidados por el agente químico dicromato no son bioquímicamente oxidantes. (26)

Tabla 18. Porcentaje de remoción de DQO sin la especie *Chryzopogon zizanioides* con su respectivo ciclo.

| % REMOCIÓN DQO SIN LA ESPECIE <i>Chryzopogon zizanioides</i> | | | |
|---|----------------------|----------------------|----------------------|
| | HUMEDAL 1 | HUMEDAL 2 | HUMEDAL 3 |
| CICLO 1 | 0,00 | 0,00 | 86,7 |
| CICLO 2 | 67,77 | 75,65 | 0,00 |
| PROMEDIO | 33,89 | 37,83 | 43,35 |
| DESVIACIÓN | 47,92 | 53,49 | 61,31 |
| CV% | 141,42 | 141,42 | 141,42 |

Fuente: Autores

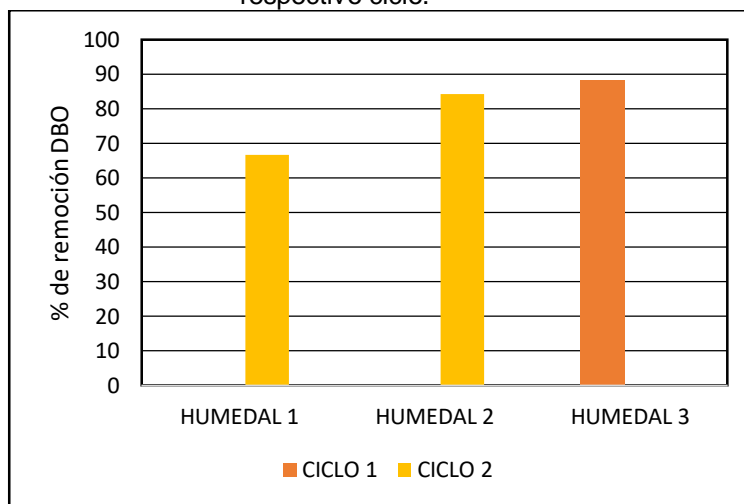
En la tabla 18, se observa el porcentaje de remoción de DQO en cada uno de los humedales artificiales tipo batch sin la presencia de la especie *Chryzopogon zizanioides*, el promedio del porcentaje de remoción, la desviación y el coeficiente de variación (CV%). Se evidencia que la desviación y el porcentaje de coeficiente de variación son inversamente proporcionales al porcentaje de remoción, el cual fue mayor en el humedal 3 y así mismo obtuvo los valores mínimos estadísticos, representando un mínimo rango de desviación en los errores de los datos experimentales.

Los humedales 1 y 2 presentan un promedio de porcentaje de remoción y desviación menores al humedal 3 pero con el mismo CV% para los 3 humedales artificiales.

B. DBO EN LA REMOCION DE HUMEDALES

Al igual que la DQO es una propiedad fisicoquímica de gran importancia para la caracterización de las aguas residuales evaluadas en los humedales artificiales tipo batch, que determina la cantidad de oxígeno que requieren los microorganismos para estabilizar la materia orgánica biodegradable en el agua residual.

Gráfica 4. Porcentaje de remoción de DBO sin la especie *Chryzopogon zizanioides* con su respectivo ciclo.



Fuente: Autores

La remoción de DBO en los humedales artificiales sin la presencia de la especie *Chryzopogon zizanioides* se debe a los procesos aerobios y anaerobios por parte de los microorganismos que se adaptan en el agua residual y se adhieren al medio filtrante(grava). La descomposición de la materia orgánica depende de la disponibilidad de oxígeno en las zonas de los humedales, en condiciones aerobias la degradación se produce en la zona superficial mientras que en condiciones anaerobias en las demás zonas de los humedales. (27)

En la anterior grafica 4, se evidencia la remoción de los humedales artificiales tipo batch con presencia de la especie *Chryzopogon zizanioides* donde se observa una relación entre la variable DQO anteriormente analizada con respecto a la DBO, mostraron la misma tendencia en la remoción de materia orgánica para cada uno de los humedales y los ciclos evaluados, es decir el humedal 3 presenta la mayor cantidad de oxígeno necesaria para que los microorganismos degraden la materia orgánica disponible en dicho humedal.

Tabla 19. Porcentaje de remoción de DBO sin la especie *Chryzopogon zizanioides* con su respectivo ciclo.

| % REMOCIÓN DE DBO SIN LA ESPECIE <i>Chryzopogon zizanioides</i> | | | |
|---|-----------|-----------|-----------|
| | HUMEDAL 1 | HUMEDAL 2 | HUMEDAL 3 |
| CICLO 1 | 0,00 | 0,00 | 88,1 |
| CICLO 2 | 66,66 | 84,21 | 0,00 |
| PROMEDIO | 33,33 | 42,11 | 44,05 |
| DESVIACIÓN | 47,14 | 59,55 | 62,30 |
| CV% | 141,42 | 141,42 | 141,42 |

Fuente: Autores

En la tabla anterior el humedal 3 evidencia mayor promedio en el porcentaje de remoción con respecto a los dos ciclos evaluados sin la presencia de la especie *Chryzopogon zizanioides*. Finalmente, los tres humedales artificiales tipo batch presentan el coeficiente de variación similar.

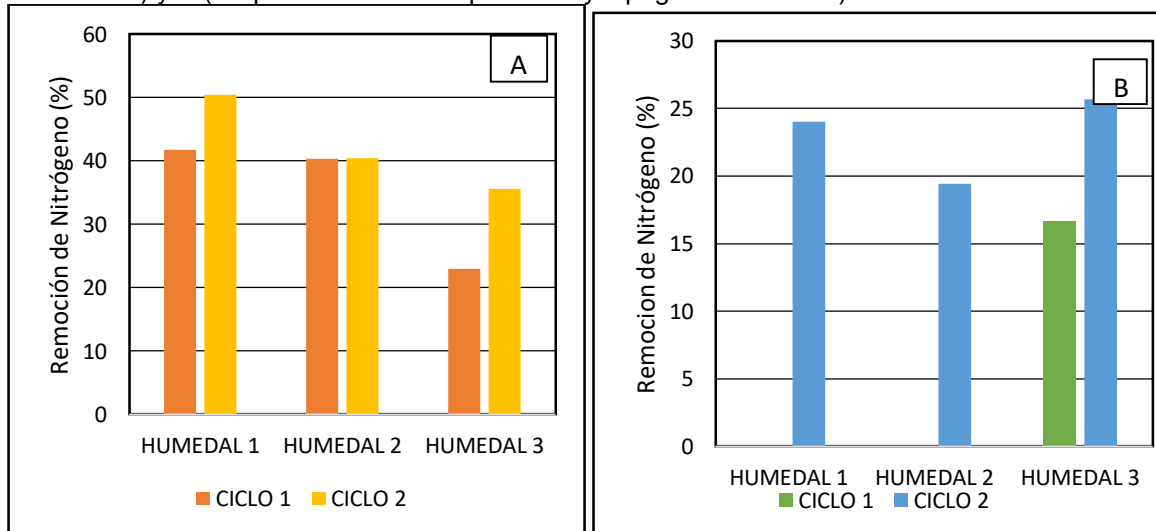
4.1.7 *Análisis de porcentaje de remoción de nitrógeno total, fósforo total, coliformes totales y fecales en los humedales artificiales tipo batch con la presencia de la especie Chryzopogon zizanioides*

Para el análisis de porcentaje de remoción de las variables analizadas DQO, DBO, nitrógeno, fósforo, Coliformes totales y fecales, se evaluó el funcionamiento tipo batch de los humedales artificiales con y sin la especie *Chryzopogon zizanioides*.

A. Nitrógeno

El nitrógeno es un nutriente importante en las aguas residuales, ya que aporta materia orgánica a los organismos vivos presentes. Pero es necesario su remoción que en este caso de estudio se está evaluando a través de unos humedales artificiales con un funcionamiento tipo batch con y sin la presencia de la especie *Chryzopogon zizanioides*. Por lo tanto, es una biotecnología donde se busca prevenir que el contenido de nitrógeno se exceda y cause graves problemas de contaminación ambiental, disminuyendo el contenido de oxígeno presente en el agua generando eutrofización a los cuerpos hídricos.

Gráfica 5. Porcentajes de remoción de nitrógeno total. A (con presencia de la especie *Chryzopogon zizanioides*) y B (sin presencia de la especie *Chryzopogon zizanioides*)



Fuente: Autores

En la gráfica 5, se observa los porcentajes de remoción de nitrógeno total en cada uno de los ciclos evaluados de los humedales artificiales tipo batch. Las formas de

nitrógeno presentes en las aguas residuales provenientes de la vivienda son las de nitrógeno orgánico, nitrógeno amoniacal, nitritos y nitratos que corresponden a la suma del nitrógeno total evaluado en las aguas residuales de interés.

En la gráfica anterior 5.A, se presenta el porcentaje de remoción de nitrógeno total en los humedales artificiales tipo batch con presencia de la especie *Chryzopogon zizanioides*, donde el humedal 1 fue el que presentó mayor remoción en los dos ciclos evaluados, la remoción de nitrógeno total se debe a la actividad biológica de las bacterias nitrificantes (*Nitrosomonas*, *Nitrosococcus*, *Nitrobacter* y *Nitrococcus*) en condiciones aerobias (nitrificación) que realizan el proceso de degradación de nitrógeno orgánico a nitrógeno amoniacal y en nitritos y nitratos. El cual cierta parte del nitrógeno amoniacal se volatiliza en el ambiente y los nitritos y nitratos se encuentran en los sustratos adheridos en el medio filtrante (grava) en los humedales artificiales. (28)

En condiciones anaerobias (desnitrificación) el nitrato es reducido por bacterias heterótrofas a nitrógeno molecular gas en condiciones anóxicas con presencia de carbono orgánico. (29)

Otro mecanismo que facilita el crecimiento de los microorganismos en los humedales artificiales es la presencia de la especie *Chryzopogon zizanioides* que capta el oxígeno atmosférico y lo transfiere a través de sus hojas y tallos hasta las raíces permitiendo la adaptación de bacterias responsables de la remoción del nitrógeno en los humedales artificiales. Por último, otro proceso responsable de la remoción de nitrógeno total en los humedales artificiales tipo batch es el proceso de fitorremediación de la especie *Chryzopogon zizanioides* que asimila el nitrógeno amoniacal y los nitritos y nitratos como fuente de energía por medio de sus raíces para su metabolismo y crecimiento, disminuyendo la cantidad de este nutriente en el agua residual tratada. (30)

Con respecto a la gráfica 5.A, se deduce que el humedal artificial 3 con su funcionamiento tipo batch es el que menor porcentaje de remoción aporta a la vivienda rural con respecto a los otros dos, por lo tanto, la relación ancho largo influye en la remoción de este nutriente, donde el humedal 3 es el más largo, pero con menor ancho a diferencia del humedal 1 que presentó mayor remoción de nitrógeno total, teniendo una relación ancho-largo contrarias al humedal 3. Por último, se observa que en el ciclo 1 se presentó menor eficiencia de remoción con respecto al ciclo 2 en los tres humedales artificiales, ya que en el ciclo 1 las plantas y el conjunto de organismos vivos en el medio se encuentran en etapa de adaptación a diferencia del ciclo 2 que la actividad biológica del pasto Vetiver aumentó y de los microorganismos adheridos al medio filtrante.

También se evidencia en la gráfica 5.B, el porcentaje de remoción de nitrógeno total en los humedales artificiales sin la presencia de la especie *Chryzopogon zizanioides*, donde el ciclo 2 fue el que presentó mayor remoción de la variable,

debido al proceso de adaptación de los microorganismos presentes en el medio, ya que al iniciar la evaluación de la remoción tipo batch sin la presencia de la especie, se descargaron y se llenaron los humedales artificiales generando nuevos hábitats y condiciones ambientales dentro de ellos, así mismo el humedal 3 fue el único que presentó remoción en el ciclo 1, contrario al humedal 1 y 2 que no evidenciaron remoción de nitrógeno total, donde posiblemente se presentó problemas de eutrofización por el exceso de este nutriente en el agua residual y a su vez una relación directamente proporcional del largo del humedal artificial con respecto a la deficiencia de remoción de la variable analizada.

En la tabla 20 y 21, se observa el porcentaje de remoción de nitrógeno total en cada uno de los humedales artificiales tipo batch con y sin la presencia de la especie *Chryzopogon zizanioides*, el promedio del porcentaje de remoción, la desviación y el coeficiente de variación (CV%).

Tabla 20. Porcentaje de remoción de Nitrógeno total con la especie *Chryzopogon zizanioides*.

| % REMOCIÓN DE NITRÓGENO TOTAL CON LA ESPECIE <i>Chryzopogon zizanioides</i> | | | |
|--|------------------|------------------|------------------|
| | HUMEDAL 1 | HUMEDAL 2 | HUMEDAL 3 |
| CICLO 1 | 41,78 | 40,37 | 23,00 |
| CICLO 2 | 50,41 | 40,47 | 35,56 |
| PROMEDIO | 46,10 | 40,42 | 29,28 |
| DESVIACIÓN | 6,10 | 0,07 | 8,88 |
| CV% | 13,24 | 0,17 | 30,33 |

Fuente: Autores

En la tabla 20 según el promedio de los porcentajes de remoción en los humedales artificiales tipo batch, el humedal que remueve mayor porcentaje de nitrógeno total es el humedal 1 y el humedal 2 presenta menor desviación de los porcentajes de remoción indicando que los datos están más cercanos a la media.

Además, que hay poca variación entre ellos, por último, el coeficiente de variación permite tener una medida de dispersión que elimine los posibles errores entre los ciclos evaluados en cada uno de los humedales artificiales donde el coeficiente de variación menor es de 0.17 siendo el humedal 2. (Sanjuán, 2018)

Tabla 21. Porcentaje de remoción de Nitrógeno sin la especie *Chryzopogon zizanioides*.

| % REMOCIÓN DE NITRÓGENO TOTAL SIN LA ESPECIE <i>Chryzopogon zizanioides</i> | | | |
|--|------------------|------------------|------------------|
| | HUMEDAL 1 | HUMEDAL 2 | HUMEDAL 3 |

| | | | |
|-------------------|--------|--------|-------|
| CICLO 1 | 0,00 | 0,00 | 16,67 |
| CICLO 2 | 24 | 19,45 | 25,67 |
| PROMEDIO | 12,00 | 9,73 | 21,17 |
| DESVIACIÓN | 16,97 | 13,75 | 6,36 |
| CV% | 141,42 | 141,42 | 30,06 |

Fuente: Autores

En la tabla 21 se observa el porcentaje de remoción de nitrógeno total en los humedales artificiales sin la presencia de la especie *Chryzopogon zizanioides*.

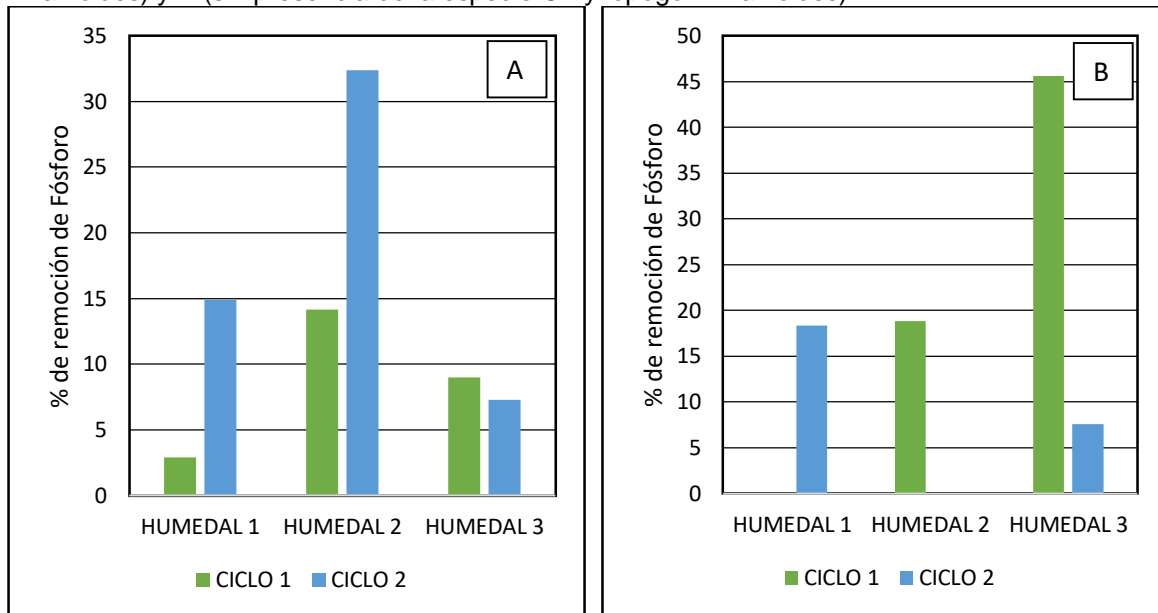
En los humedales artificiales 1 y 2 el porcentaje de remoción arroja un valor de 0% para el ciclo 1, debido a que en el análisis de laboratorio arrojó una concentración menor en el afluente con respecto al efluente y al calcular el porcentaje de remoción da negativo, indicando una remoción de nitrógeno total del 0%, teniendo en cuenta el promedio del porcentaje de remoción, la desviación y el CV(%) el humedal 3 es el más eficiente, el valor de la desviación es mínimo, es decir los datos de los dos ciclos se acercan a la media y con respecto al coeficiente de variación es el que presenta los mínimos errores entre sus ciclos.

B. Fósforo

Al igual que el nitrógeno total, el fósforo total es un nutriente que favorece el crecimiento y la adaptación de microorganismos encargados para la estabilización de la materia orgánica del agua residual doméstica de la vivienda rural en los humedales artificiales tipo batch, debe ser controlado en el agua residual porque en exceso genera impactos ambientales a los recursos naturales y a los seres vivos, causando proliferación de algas y a su vez la disminución del oxígeno presente en el medio.

En la gráfica 6, se observa los porcentajes de remoción de fósforo total en cada uno de los ciclos evaluados de los humedales artificiales tipo batch.

Gráfica 6. Porcentajes de remoción de fósforo total. A (con presencia de la especie *Chryzopogon zizanioides*) y B (sin presencia de la especie *Chryzopogon zizanioides*).



Fuente: Autores

El fósforo en el agua residual proveniente de la vivienda rural se debe principalmente a los desechos humanos, detergentes sintéticos y productos de limpieza. El fósforo contenido en el agua residual se presenta en tres formas: ortofosfatos inorgánicos solubles, fosfatos condensados y fósforo inorgánico. (31)

Los humedales artificiales tipo batch pueden remover hasta un 50% de fósforo en el agua residual, donde se le atribuye a la especie *Chryzopogon zizanioides* una capacidad de remoción entre 6 a 15 % por sus propiedades fisiológicas y metabólicas que permiten la asimilación de este nutriente en forma de fosfatos (PO_4) mientras que el 75% a 90% al medio filtrante (grava) (32), por los microorganismos que se encuentran adheridos y que son los encargados de eliminar y remover este nutriente en los humedales artificiales como *Acinetobacter*, *Pseudomonas vesicularis*, *Klebsiella pneumoniae*, *Micrococcus*, *Aeromonas hydrophila*, *Arthrobacter globiformis*, *Moraxella sp.* y *Enterobacter sp.* Algunas de estas bacterias son estrictamente aerobias y otras fermentativas, condicionadas a ambientes óptimos de temperatura y pH los cuales eran factores no controlables en el estudio que pudieron afectar la adaptación de las bacterias encargadas de remover el fósforo en los humedales artificiales como se observa en las muestras blancas de los dos ciclos evaluados que no se presentaron remociones. (33)

Los resultados de remoción de fósforo en los humedales artificiales tipo batch se relacionan con lo anteriormente mencionado donde se obtuvieron remociones menores al 50%, siendo el humedal 2 (6.A) el más eficiente en los dos ciclos evaluados con presencia de la especie *Chryzopogon zizanioides* con un porcentaje de remoción en el primer ciclo de 14,13 % y en el segundo ciclo de 32,37%, mientras

que en el humedal blanco (6.B) , el humedal 3 fue el que mayor obtuvo remociones de este nutriente en los dos ciclos ,en el primer ciclo de 45,6% y en el segundo de 7,61.

En la tabla 22 y 23 se observa el porcentaje de remoción de fósforo total en cada uno de los humedales artificiales tipo batch con y sin presencia de la especie *Chryzopogon zizanioides*, el promedio del porcentaje de remoción, la desviación y el coeficiente de variación (CV%).

Tabla 22. Porcentaje de remoción de Fósforo total con presencia de la especie *Chryzopogon zizanioides*.

| % REMOCIÓN DE FÓSFORO TOTAL CON LA ESPECIE <i>Chryzopogon zizanioides</i> | | | |
|--|------------------|------------------|------------------|
| | HUMEDAL 1 | HUMEDAL 2 | HUMEDAL 3 |
| CICLO 1 | 2,92 | 14,13 | 8,99 |
| CICLO 2 | 14,89 | 32,37 | 7,29 |
| PROMEDIO | 8,91 | 23,25 | 8,14 |
| DESVIACIÓN | 8,46 | 12,90 | 1,20 |
| CV% | 95,05 | 55,47 | 14,77 |

Fuente: Autores

En la tabla anterior según el promedio de los porcentajes de remoción en los humedales artificiales tipo batch, el humedal que remueve mayor porcentaje de fósforo total es el humedal 2, el que presenta menor desviación de los porcentajes de remoción es el humedal 3 indicando que los datos están más cercanos a la media y que hay poca variación entre ellos , por último el coeficiente de variación permite tener una medida de dispersión que elimine los posibles errores entre los ciclos evaluados en cada uno de los humedales artificiales donde el coeficiente de variación menor es de 14,77 siendo el humedal 3. (Sanjuán, 2018)

Tabla 23. Porcentaje de remoción de Fósforo sin presencia de la especie *Chryzopogon zizanioides*.

| % REMOCIÓN DE FÓSFORO TOTAL SIN LA ESPECIE <i>Chryzopogon zizanioides</i> | | | |
|--|------------------|------------------|------------------|
| | HUMEDAL 1 | HUMEDAL 2 | HUMEDAL 3 |
| CICLO 1 | 0,00 | 18,85 | 45,6 |
| CICLO 2 | 18,37 | 0,00 | 7,61 |
| PROMEDIO | 9,19 | 9,43 | 26,61 |
| DESVIACIÓN | 12,99 | 13,33 | 26,86 |
| CV% | 141,42 | 141,42 | 100,97 |

Fuente: Autores

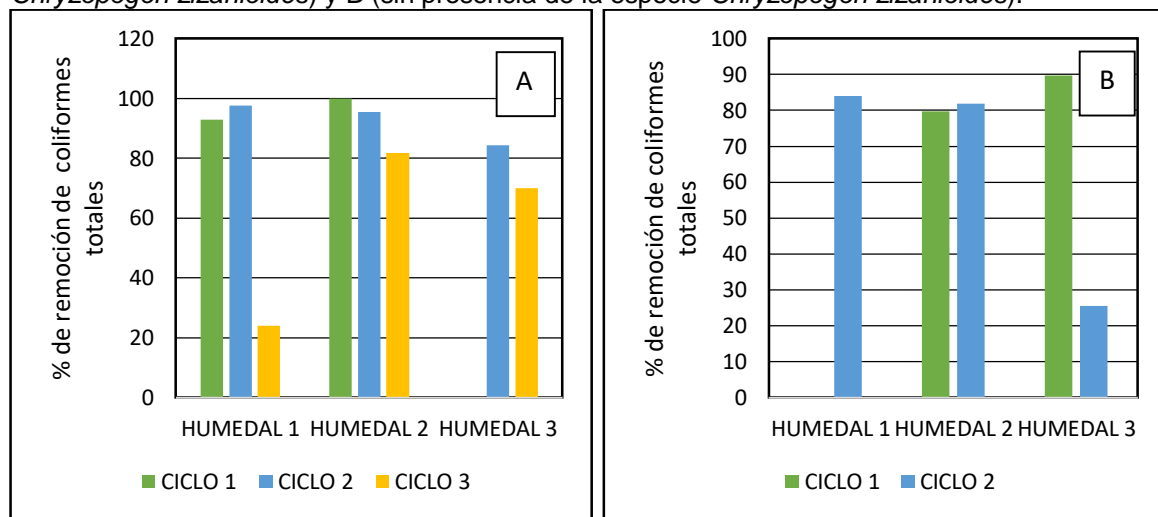
En la tabla anterior se observa el porcentaje de los humedales artificiales tipo batch sin la presencia de la especie *Chryzopogon zizanioides*, donde el promedio del porcentaje de remoción y la desviación estándar fue mayor y el coeficiente de variación fue menor en el humedal 3, también el promedio de los porcentajes de

remoción y la desviación fueron menores al humedal 3 pero con el coeficiente de variación igual, lo anterior da entender que el humedal más eficiente es el 3.

C. Coliformes totales

En la gráfica 7, se presentan los porcentajes de remoción de Coliformes totales, correspondiente a los géneros bacterianos: *Escherichia coli*, *Citrobacter*, *Enterobacter* y *Klebsiella* en cada uno de los ciclos evaluados de los humedales artificiales tipo batch con y sin la presencia de la especie *Chryzopogon zizanioides*. Larrea Murell, J., Rojas Badía, M., Romeu Álvarez, B., Rojas Hernandez, N. and Heydrich Perez, M. (2013)

Gráfica 7. Porcentajes de remoción de coliformes totales. A (con presencia de la especie *Chryzopogon zizanioides*) y B (sin presencia de la especie *Chryzopogon zizanioides*).



Fuente: Autores

En la gráfica 7.A, se evidencia el comportamiento de la remoción en los humedales artificiales tipo batch, en cada uno de los ciclos evaluados. En la gráfica se presenta un porcentaje de remoción mayor en los humedales artificiales 1 y 2 en los ciclos 1 y 2 con respecto al humedal 3 que presenta menor porcentaje de remoción de Coliformes totales en dichos ciclos.

Otra observación corresponde a que el ciclo 3 fue el que presentó menor remoción de Coliformes totales en los humedales artificiales 1 y 3, mientras que en el humedal 3 el ciclo 1 fue el que presentó menor porcentaje de remoción, dando como resultado 0, esta situación se pudo haber dado por diferentes circunstancias, primero cabe resaltar que la permanencia de los habitantes en la vivienda rural es variable, por lo tanto no se presenta una descarga de agua residual en los sanitarios constante y el valor de la concentración de Coliformes totales en el afluente fue menor con respecto a la concentración de Coliformes totales en el efluente, arrojando como resultado un valor negativo que se interpreta como una remoción

de 0% siendo no representativa. Otra circunstancia sería por factores externos, por la forma de recolección de las muestras de agua residual para su posterior análisis, teniendo en cuenta que los Coliformes totales no son buenos indicadores de contaminación fecal y que desaparecen rápidamente al tener contacto con el agua residual ya que conforman el microbiota normal del tracto gastrointestinal, tanto del ser humano como en los animales homeotermos y están presentes en grandes cantidades en ellos. Larrea Murell, J., Rojas Badia, M., Romeu Alvarez, B., Rojas Hernandez, N. and Heydrich Perez, M. (2013)

En la anterior gráfica 7.B, el humedal con mayor eficiencia de remoción con respecto a los dos ciclos evaluados sin la presencia de la especie *Chryzopogon zizanioides* fue el humedal 2, debido a las condiciones ambientales que se presentaron en el medio lo cual favorecieron la adaptación de los organismos pertenecientes al grupo de Coliformes totales. También se observa que en el ciclo 2 el humedal que menos removió coliformes totales fue el humedal 3, por la poca materia orgánica biodegradable disponible en el humedal que condiciona la supervivencia de dichos microorganismos.

Tabla 24. Porcentaje de remoción de Coliformes con la presencia de la especie *Chryzopogon zizanioides*.

| % REMOCION DE COLIFORMES TOTALES CON LA PRESENCIA DE LA ESPECIE <i>Chryzopogon zizanioides</i> | | | |
|---|------------------|------------------|------------------|
| | HUMEDAL 1 | HUMEDAL 2 | HUMEDAL 3 |
| CICLO 1 | 92,79 | 100 | 0,00 |
| CICLO 2 | 97,61 | 95,53 | 84,36 |
| CICLO 3 | 23,9 | 81,73 | 70 |
| PROMEDIO | 71,43 | 92,42 | 51,45 |
| DESVIACIÓN | 41,24 | 9,52 | 45,13 |
| CV% | 57,73 | 10,30 | 87,72 |

Fuente: Autores

En la tabla anterior según el promedio de los porcentajes de remoción en los humedales artificiales tipo batch, el humedal que remueve mayor porcentaje de Coliformes totales fue el humedal 2, así mismo presenta menor desviación de los porcentajes de remoción lo que indica que los datos están más cercanos a la media es decir que hay poca variación entre ellos, además el coeficiente de variación permite tener una medida de dispersión que elimine los posibles errores entre los ciclos evaluados en cada uno de los humedales artificiales donde el coeficiente de variación menor es de 10,30 siendo en el humedal 2, a diferencia de las anteriores propiedades fisicoquímicas. En esta variable microbiológica hay una relación entre el promedio del porcentaje de remoción, desviación y coeficiente de variación interpretándose que el humedal 2 es el más eficiente de los tres que se evaluaron con la especie *Chryzopogon zizanioides*. (Sanjuán, 2018)

Tabla 25. Porcentaje de remoción de Coliformes totales sin la presencia de la especie *Chryzopogon zizanioides*.

| % REMOCION DE COLIFORMES TOTALES SIN LA PRESENCIA DE LA ESPECIE <i>Chryzopogon zizanioides</i> | | | |
|---|------------------|------------------|------------------|
| | HUMEDAL 1 | HUMEDAL 2 | HUMEDAL 3 |
| CICLO 1 | 0,00 | 79,68 | 89,68 |
| CICLO 2 | 83,94 | 81,87 | 25,59 |
| PROMEDIO | 41,97 | 80,78 | 57,64 |
| DESVIACIÓN | 59,35 | 1,55 | 45,32 |
| CV% | 141,42 | 1,92 | 78,63 |

Fuente: Autores

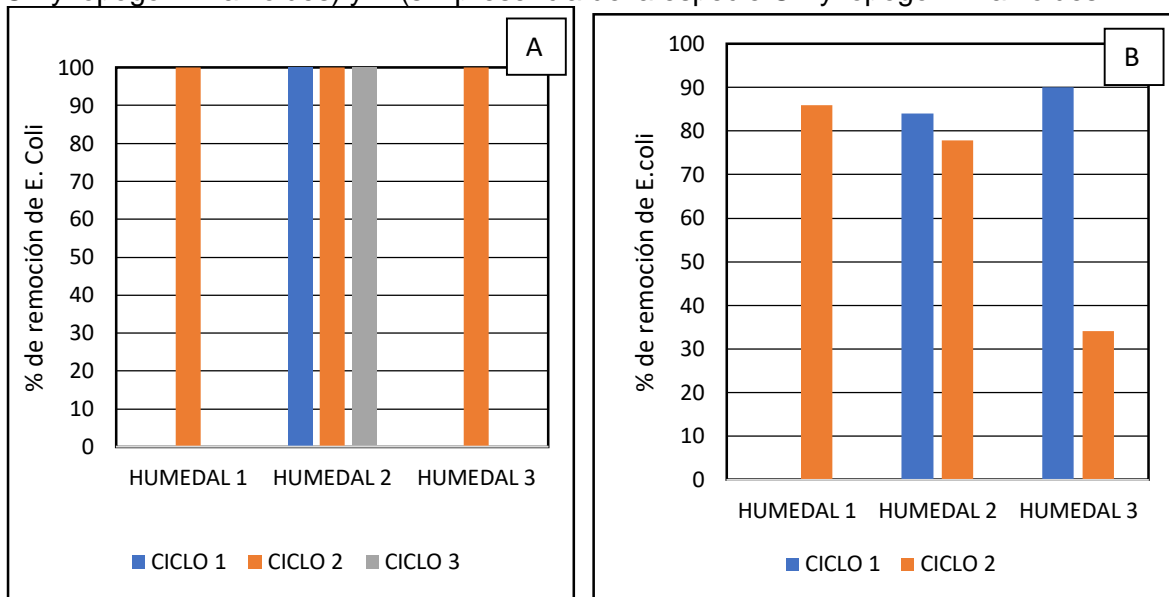
En la tabla 25 el humedal 2 fue el que presentó mayor remoción de Coliformes totales sin la presencia de la especie *Chryzopogon zizanioides* en condición batch y con menor desviación y porcentaje de coeficiente de variación (CV%). Lo contrario a los humedales artificiales 1 y 2 que el promedio del porcentaje de remoción y la desviación son inversamente proporcionales al porcentaje de coeficiente de variación (Cv%).

D. Coliformes fecales

Un subgrupo de Coliformes totales, son los Coliformes fecales en los cuales se encuentran el género *Escherichia coli* representando un 95 % a este subgrupo y las bacterias del género *Klebsiella* representando un 5% del mismo. Los cuales son indicadores de materia fecal, se presentan en cantidades bajas en las heces fecales de los seres humanos y de los animales homeotérmicos, sin embargo, la humedad, las altas temperaturas, la materia orgánica y el pH en el agua residual son condiciones necesarias para la formación de biopelículas que se adhieren en las tuberías y medios filtrantes de los humedales artificiales. (1)

En la gráfica 8, se observa los porcentajes de remoción de coliformes fecales en cada uno de los ciclos evaluados de los humedales artificiales tipo batch.

Gráfica 8. Porcentajes de remoción de coliformes fecales. A (con presencia de la especie *Chryzopogon zizanioides*) y B (sin presencia de la especie *Chryzopogon zizanioides*).



Fuente: Autores

En la gráfica 8.A, el porcentaje de remoción de *E. coli* es mayor en el humedal 2 en todos los ciclos evaluados con respecto a los demás humedales artificiales tipo batch, donde se presenta un porcentaje de remoción del 100%, es decir en los tres ciclos se eliminaron los organismos patógenos e indicadores de contaminación fecal del agua residual proveniente de la vivienda rural.

Así mismo en los humedales artificiales 1 y 3 se presenta el mismo comportamiento en el porcentaje de remoción de *E. coli* donde el ciclo 1 y 3 arrojaron un valor de remoción de 0% el cual se debe a la concentración de microorganismos de este género, que fue mayor en el punto de muestreo efluente con respecto al punto de muestreo afluente, es decir no se eliminaron los organismos patógenos en el agua residual, al contrario se adaptaron a las condiciones que se presentan dentro de los humedales artificiales con presencia de la actividad biológica de la especie *Chryzopogon zizanioides*, el aporte de nutrientes y demás, generando un crecimiento bacteriano durante esos dos ciclos. Por último, el ciclo 2 fue el que mayor obtuvo porcentaje de remoción de microorganismos del género *E. coli* en los tres humedales artificiales, siendo el más eficiente y representativo. (Cirelli, 1996)

En la grafica 8.B, se observa que el humedal 3, es el que presenta el mayor y menor porcentaje de remocion de Coliformes fecales tanto en el ciclo 1 y ciclo 2, debido a las diferencias de materia organica biodegradable presente en el agua residual descargada de los sanitarios en la vivienda producto de las necesidades fisiologicas de los habitantes, sin embargo el humedal 2 fue el que presentó una remocion significativa en los dos ciclos.

En la tabla 26 y 27 se observa el porcentaje de remoción de Coliformes fecales en cada uno de los humedales artificiales tipo batch con y sin la presencia de la especie *Chryzopogon zizanioides*, el promedio del porcentaje de remoción, la desviación y el coeficiente de variación (CV%).

Tabla 26. Porcentaje de remoción de E. coli con la presencia de la especie *Chryzopogon zizanioides*.

| % REMOCION DE COLIFORMES FECALES CON LA PRESENCIA DE LA ESPECIE <i>Chryzopogon zizanioides</i> | | | |
|---|------------------|------------------|------------------|
| | HUMEDAL 1 | HUMEDAL 2 | HUMEDAL 3 |
| CICLO 1 | 0,00 | 100 | 0,00 |
| CICLO 2 | 100 | 100 | 100 |
| CICLO 3 | 0,00 | 100 | 0,00 |
| PROMEDIO | 33,33 | 100 | 33,33 |
| DESVIACIÓN | 57,74 | 0,00 | 57,74 |
| CV% | 173,21 | 0,00 | 173,21 |

Fuente: Autores

En la tabla anterior se presenta el comportamiento del porcentaje de remoción de los organismos E. coli indicadores de contaminación fecal en los tres humedales artificiales para cada ciclo evaluado, con presencia de la especie *Chryzopogon zizanioides* donde el humedal 1 y 3 presentan el mismo comportamiento estadístico en el promedio, desviación y coeficiente de variación (CV%). (2)

Por otro lado, el humedal 2 es el más eficiente, porque fue el que presentó mayor porcentaje de remoción de organismos E. coli según el promedio estadístico, la desviación entre los datos experimentales fue 0 porque en los tres ciclos el porcentaje de remoción fue de 100% y así mismo el Coeficiente de variación (CV%) arrojó un porcentaje de 0%.

Tabla 27. Porcentaje de remoción de E. coli sin la presencia de la especie *Chryzopogon zizanioides*.

| % REMOCION DE COLIFORMES FECALES SIN LA PRESENCIA DE LA ESPECIE <i>Chryzopogon zizanioides</i> | | | |
|---|------------------|------------------|------------------|
| | HUMEDAL 1 | HUMEDAL 2 | HUMEDAL 3 |
| CICLO 1 | 0,00 | 84,02 | 90,03 |
| CICLO 2 | 85,92 | 77,92 | 34,15 |
| PROMEDIO | 42,96 | 80,97 | 62,09 |
| DESVIACIÓN | 60,75 | 4,31 | 39,51 |
| CV% | 141,42 | 5,33 | 63,64 |

Fuente: Autores

En la tabla anterior respecto al promedio de porcentaje de remoción sin la presencia de la especie *Chryzopogon zizanioides*, el humedal 2 fue el más eficiente, debido a

que en sus dos ciclos se presentan los más altos porcentajes de remoción respecto a los otros humedales, así mismo la desviación y CV% fueron menores ya que sus valores no están tan alejados de la media y la diferencia entre los errores es mínima.

4.2 FASE II: Establecimiento la cinética de remoción de los parámetros químicos analizados, para el sistema de humedales artificiales, en una vivienda rural en el municipio de Floridablanca.

Para evaluar la capacidad de remoción de los humedales artificiales tipo batch con presencia de la especie *Chryzopogon zizanioides*, se propuso establecer una cinética de remoción que representara la velocidad de las variables químicas evaluadas en la vivienda rural del municipio de Floridablanca. Esta cinética se estableció a través del método gráfico, donde se realizó una aproximación lineal al modelo cinético de degradación de materia orgánica. Además, se dedujo el valor de k que mejor se comportó en la degradación de cada variable analizada para cada humedal artificial tipo batch.

Cálculo de la velocidad de remoción

Para obtener la constante cinética de velocidad de la reacción en el proceso de remoción de las variables químicas analizadas, se acudió a los datos experimentales para la evaluación de los humedales artificiales tipo batch con presencia de la especie *Chryzopogon zizanioides*.

Inicialmente se estableció inicialmente la relación de los resultados en los puntos de muestreo afluente y efluente en los humedales artificiales tipo batch, luego se obtuvo el logaritmo natural para los valores y se definió la línea de tendencia que mejor se ajusta a los puntos que tiene el $\ln(C)$ y $\ln(C_0)$ representando los valores de x y y en la ecuación de una recta. En la ecuación lineal se consiguió el valor de k , interpretándose como la constante de remoción siendo más significativa cuando se acerca a uno.

En la tabla 28 se presenta los datos de concentración experimentales del humedal 1 para cada ciclo evaluado en los puntos de muestreo de la variable DQO.

Así mismo se realizó para los tres humedales artificiales en los ciclos evaluados y sus puntos de muestreo para cada una de las variables analizadas. En el anexo A se encuentran las tablas para las variables DQO, DBO, nitrógeno y fósforo en los humedales artificiales.

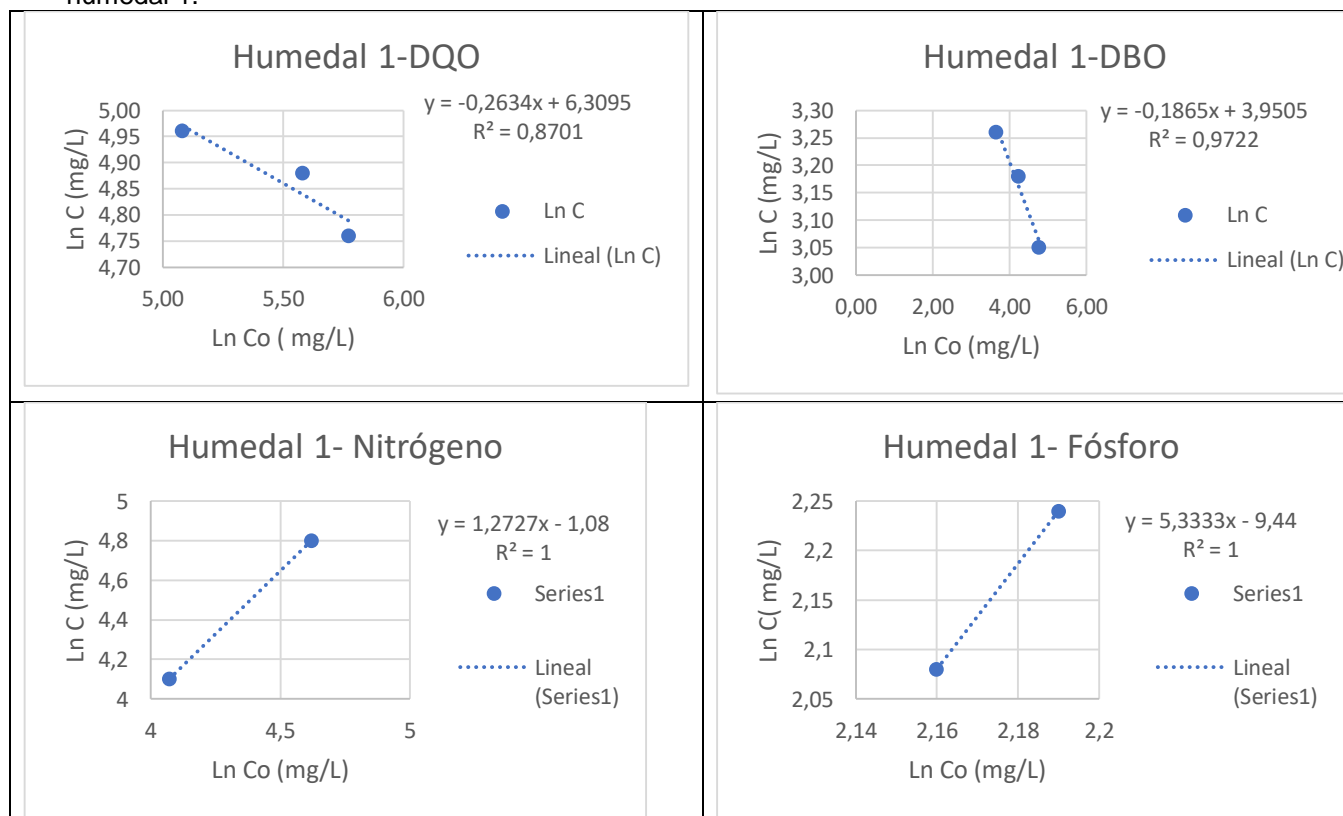
Tabla 28. Datos de concentración experimentales del humedal 1 para cada ciclo evaluado en los puntos de muestreo de la variable DQO.

| HUMEDAL 1 | | | | | | | | | |
|-----------|------------|--------------|--------------|----------|--------|--------|--------|--------|----------|
| DQO | | | | | | | | | |
| Ciclos | Entrada Co | Compuesta C1 | Compuesta C2 | Salida C | Ln Co | Ln C1 | Ln C2 | Ln C | Promedio |
| Ciclo 1 | 266 | 128 | 160 | 113 | 5,5835 | 4,8520 | 5,0752 | 4,7274 | 4,88 |
| Ciclo 2 | 160 | 143 | 160 | 128 | 5,0752 | 4,9628 | 5,0752 | 4,8520 | 4,96 |
| Ciclo 3 | 320 | 86,4 | 144 | 128 | 5,7683 | 4,4590 | 4,9698 | 4,8520 | 4,76 |

Fuente: Autores

En el gráfico 9 se presenta la regresión lineal para la obtención de los valores de pendiente y porcentaje de correlación de la variable DQO, DBO, nitrógeno y fósforo en el humedal 1 tipo batch con presencia de la especie *Chryzopogon zizanioides*.

Gráfica 9. Regresión lineal para los valores de DQO, DBO, Nitrógeno y fósforo totales en el humedal 1.



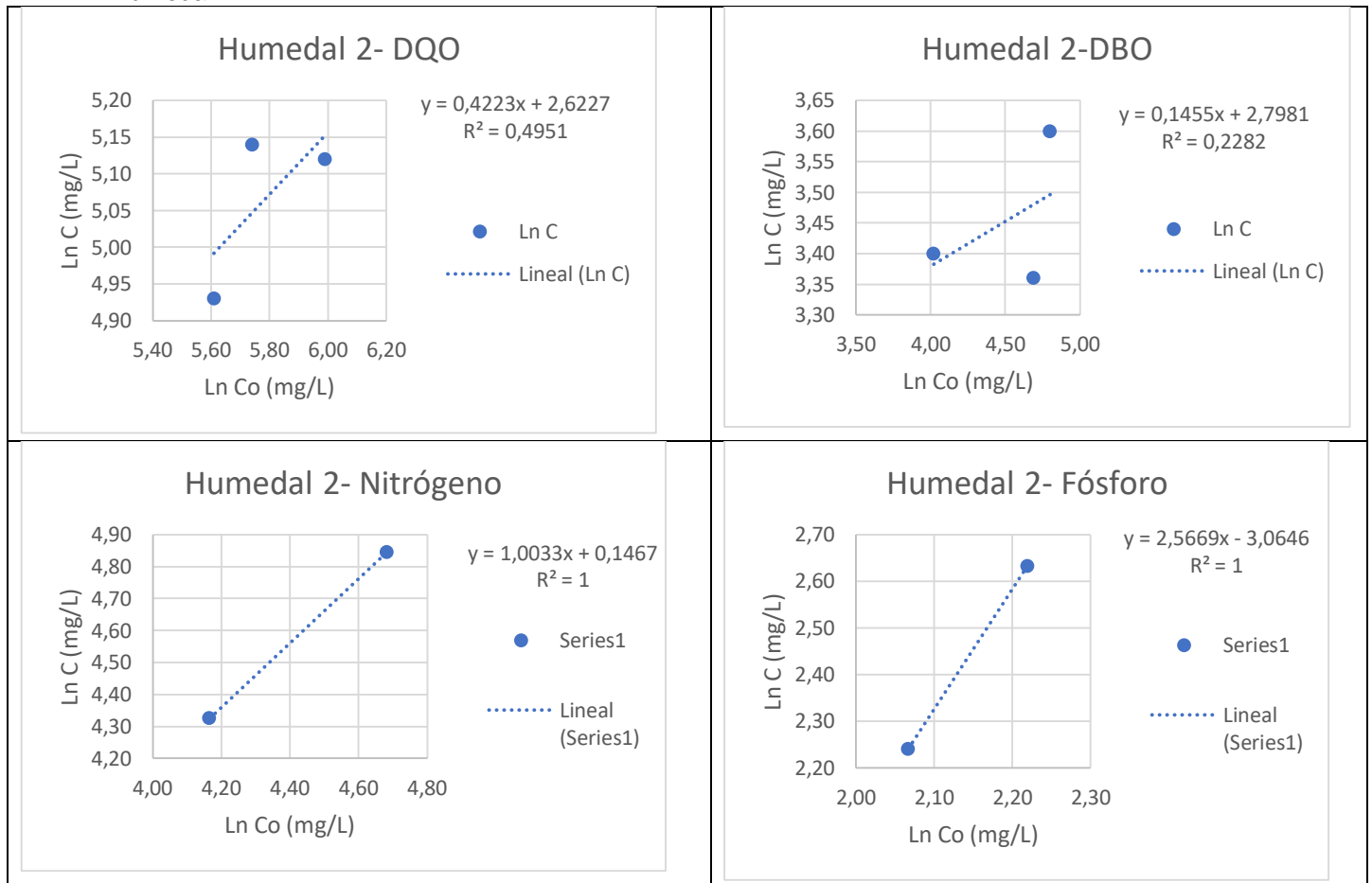
Fuente: Autores

Según las gráficas de regresión de las variables DQO, DBO, nitrógeno y fósforo en el humedal 1, se obtuvo una buena correlación (R^2) con valores de 0.8701,0.9722,1

y 1 respectivamente, lo que significa que el humedal 1 tiende a comportarse tipo batch, debido a que los valores tienden acercarse a la unidad.

En el grafico 10 se presenta la regresión lineal para la obtención de los valores de pendiente y porcentaje de correlación de la variable DQO, DBO, nitrógeno y fósforo en el humedal 2 tipo batch con presencia de la especie *Chryzopogon zizanioides*.

Gráfica 10. Regresión lineal para los valores de DQO, DBO, Nitrógeno y fósforo totales en el humedal 2.

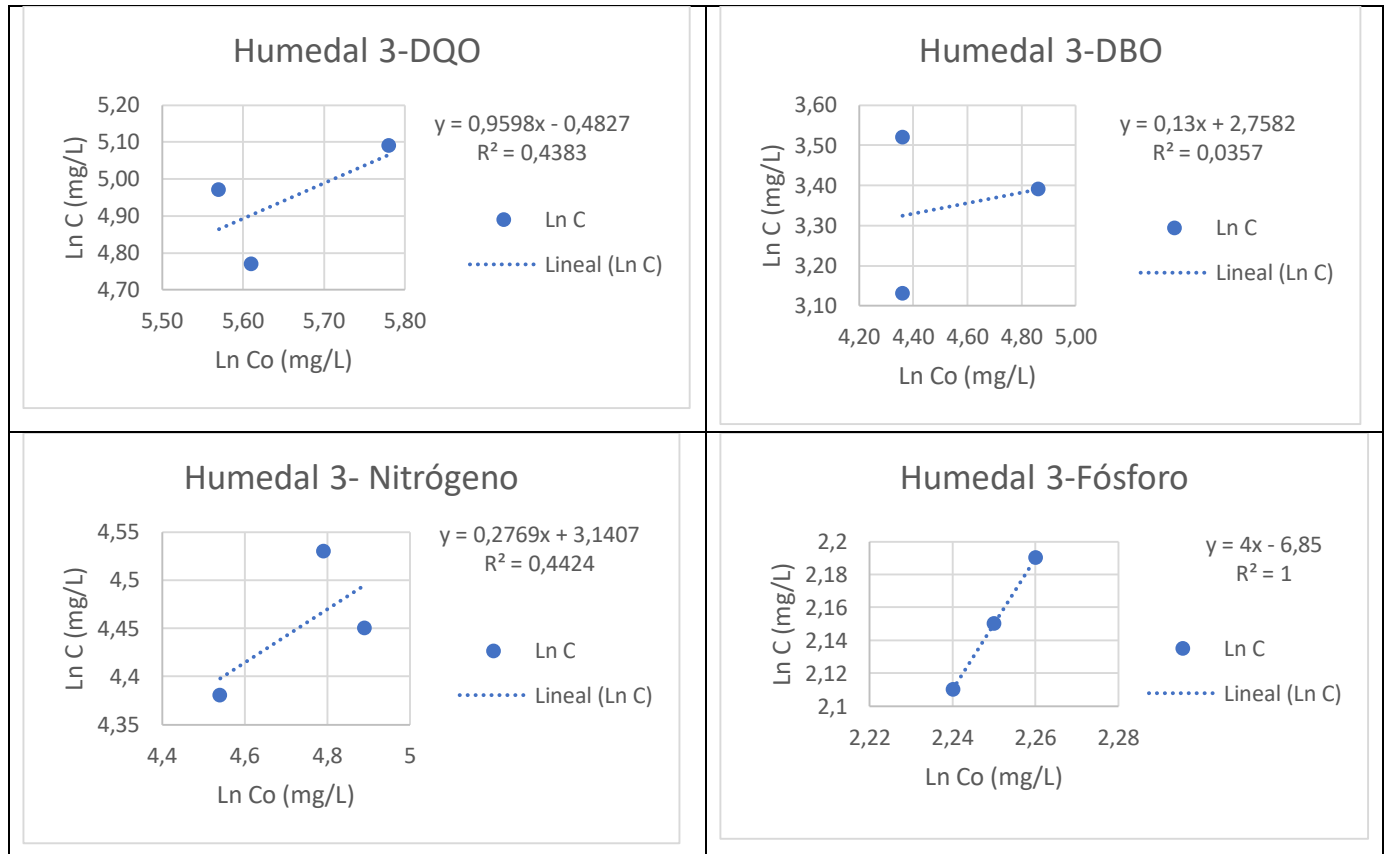


Fuente: Autores

Según las gráficas de regresión de las variables DQO, DBO, en el humedal 2, se obtuvo una correlación no significativa con valores de 0.4951 y 0,2282 muy alejados a la unidad, debido a factores externos o no controlables en las tomas de muestras o a errores aleatorios generados en el análisis de laboratorio. También se determinó una correlación para las variables de nitrógeno y fósforo, ambas arrojaron un valor de 1, siendo significativas a diferencia de las variables anteriormente mencionadas, por lo tanto, se afirma que el humedal 2 no tiene funcionamiento tipo batch por los resultados de la correlación(R²) que dan alejados a la unidad en dos de las variables analizadas.

En el gráfico 11, se presenta la regresión lineal para la obtención de los valores de pendiente y porcentaje de correlación de la variable DQO, DBO, nitrógeno y fósforo en el humedal 3 tipo batch con presencia de la especie *Chryzopogon zizanioides*.

Gráfica 11. Regresión lineal para los valores de DQO, DBO, Nitrógeno y fósforo totales en el humedal 3.



Fuente: Autores

Según las gráficas de regresión de las variables DQO, DBO y nitrógeno con valores de correlación de 0,4383, 0,0357 y 0,4424 se encuentran muy alejados de la unidad, lo que indica que son poco significativas. Los resultados demuestran que se presentó por fallas en la toma de muestras, factores externos y no controlables como las condiciones ambientales y el análisis en el laboratorio, por consiguiente, no se puede inferir que el humedal artificial 3 se comporta con un funcionamiento tipo batch, a diferencia de la variable fósforo que el valor de correlación fue de 1 siendo significativa. Para el humedal 3 con esta correlación no representativa para inferir que el humedal es tipo batch ya que las demás variables se comportaron de forma contraria.

Después de haber realizado el análisis gráfico para cada variable en cada uno de los humedales artificiales tipo batch se determinó la constante de remoción (K)

teniendo en cuenta la ecuación que representa la cinética de primer orden en un reactor tipo batch y la ecuación de la recta:

En las tablas 29, 30 y 31 se presentan los valores de K arrojados para las variables DBO, DQO, nitrógeno y fósforo en los humedales artificiales.

Tabla 29. Valores de k para las variables DQO, DBO, nitrógeno y fósforo del humedal 1.

| | t (d) | m | b | K(S⁻¹) |
|------------------|--------------|----------|----------|--------------------------|
| DQO | 11 | 0,2634 | 6,3095 | 0,5735 |
| DBO | 11 | 0,1865 | 3,9505 | 0,3591 |
| Nitrógeno | 11 | 1,2727 | 1,08 | 0,0981 |
| Fósforo | 11 | 5,3333 | 9,44 | 0,8581 |

Fuente: Autores

Tabla 30. Valores de k para las variables DQO, DBO, nitrógeno y fósforo del humedal 2.

| | t (d) | m | b | k(S⁻¹) |
|------------------|--------------|----------|----------|--------------------------|
| DQO | 11 | 0,4223 | 2,6227 | 0,2384 |
| DBO | 11 | 0,1455 | 2,7981 | 0,2543 |
| Nitrógeno | 11 | 1,0033 | 0,1467 | 0,0133 |
| Fósforo | 11 | 2,5669 | 3,0646 | 0,2786 |

Fuente: Autores

Tabla 31. Valores de k para las variables DQO, DBO, nitrógeno y fósforo del humedal 3.

| | t (d) | m | b | k(S⁻¹) |
|------------------|--------------|----------|----------|--------------------------|
| DQO | 11 | 0,9598 | 0,4827 | 0,0439 |
| DBO | 11 | 0,13 | 2,7582 | 0,2507 |
| Nitrógeno | 11 | 0,2769 | 3,1407 | 0,2855 |
| Fósforo | 11 | 4 | 6,85 | 0,6227 |

Fuente: Autores

Para la remoción de DBO en los tres humedales artificiales tipo batch con presencia de la especie *Chryzopogon zizanioides* para el tratamiento de las aguas residuales provenientes de una vivienda rural , según Crites y Tchobanoglous(1998) estiman una k de 1.1 día⁻¹ mientras Tchobanoglous estima un k de 1.35 día⁻¹ .Para los tres humedales artificiales se evaluó las constantes de reacción para DBO, arrojando constantes de 0.3591, 0.2543, 0.2507 siendo valores alejados a los estipulados por los autores citados.

Es importante tener en cuenta que la cinética de remoción en los humedales artificiales tipo batch con presencia de la especie *Chryzopogon zizanioides* se ve influencia a las condiciones ambientales del medio donde se realizó el estudio IN

SITU. En este estudio no se tuvo variables controlables y escala de laboratorio. Las variables químicas y biológicas analizadas para la cinética dependían de la actividad biológica dentro del humedal y del contenido de materia orgánica soluble del agua residual proveniente de las actividades domésticas de los habitantes.

Las constantes de reacción de primer orden para la remoción de nitrógeno y fósforo totales en los tres humedales artificiales fueron menor a 1 día^{-1} , resultado que indica que es necesario un tiempo de permanencia menor al que se evaluaron los humedales artificiales tipo batch para obtener una constante de velocidad superior. El tiempo de permanencia es una de las constantes que influenciaron en la eficiencia de las variables químicas y biológicas.

Cabe resaltar que para obtener un valor significativo en la cinética de remoción de las variables analizadas es necesario aumentar el número de muestras durante cada ciclo.

4.3 FASE III: Determinar el ajuste de los resultados experimentales a los modelos matemáticos de ecuaciones de regresión, establecidos al funcionamiento tipo batch en humedales artificiales, para el tratamiento de aguas residuales en zona tropical.

Teniendo como referencia la investigación ya finalizada de (Rousseau, Vanrolleghem y De Pauw, 2004) con los datos de las variables analizadas (DBO, nitrógeno y fósforo) se determinó el ajuste de estos resultados a los modelos de regresión lineal propuestos y consigo el modelo más eficiente al comportamiento de cada variable anteriormente mencionada. Los modelos analizados fueron los que se encuentran en la tabla 32.

En la tabla 1 se presentan los datos de concentración de la entrada para cada humedal de la variable DBO y la suma promedio de los datos de concentración con respecto a cada ciclo, siendo este el humedal promedio. Las tablas de nitrógeno y fósforo se encuentran en el anexo B.

Tabla 32. Datos de concentración de la entrada para la variable DBO.

| INFORMACIÓN DE ENTRADA | | | | | | | |
|------------------------|-----|----------|---------|-----------|-----------|-----------|------------------|
| CICLO | DÍA | VARIABLE | LUGAR | HUMEDAL 1 | HUMEDAL 2 | HUMEDAL 3 | HUMEDAL PROMEDIO |
| 1 | 0 | DBO | Entrada | 69,5 | 121,4 | 77,9 | 89,6 |
| 2 | 0 | DBO | Entrada | 38,47 | 55,5 | 129,6 | 74,52 |
| 3 | 0 | DBO | Entrada | 118,21 | 108,8 | 78,47 | 101,83 |

Fuente: Autores

En la tabla 33 se presentan los datos de concentración de la salida para cada humedal para la variable DBO y la suma promedio de los datos de concentración

con respecto a cada ciclo, siendo este el humedal promedio. Los datos de concentración de salida de Nitrógeno y Fósforo se encuentran en el anexo B.

Tabla 33. Datos de concentración de la salida para la variable DBO de los humedales artificiales tipo batch con el humedal promedio.

| INFORMACIÓN DE SALIDA | | | | | | | |
|-----------------------|-----|----------|--------|-----------|-----------|-----------|------------------|
| CICLO | DÍA | VARIABLE | LUGAR | HUMEDAL 1 | HUMEDAL 2 | HUMEDAL 3 | HUMEDAL PROMEDIO |
| 1 | 11 | DBO | Salida | 20,3 | 28,19 | 24,77 | 24,42 |
| 2 | 11 | DBO | Salida | 16,62 | 29,11 | 24,55 | 23,43 |
| 3 | 11 | DBO | Salida | 22,38 | 24,56 | 30 | 25,65 |

Fuente: Autores

En la tabla 34, se evidencia la suma, máximo, mínimo, promedio y desviación estándar de los datos de la tabla anterior para los humedales artificiales tipo batch con el parámetro DBO. En el anexo B (tablas 5 y 6), se encuentran la suma, máximo, mínimo, promedio y desviación estándar para los parámetros de Nitrógeno y fósforo.

Tabla 34. Datos para la variable DBO de los humedales artificiales tipo batch.

| | | | | |
|----------------------------|-------|-------|-------|-------|
| SUMA | 59,3 | 81,86 | 79,32 | 73,49 |
| MAXIMO | 22,38 | 29,11 | 30 | 25,65 |
| MINIMO | 16,61 | 24,56 | 24,55 | 23,43 |
| PROMEDIO | 19,77 | 27,29 | 26,44 | 24,50 |
| DESVIACIÓN ESTANDAR | 2,92 | 2,41 | 3,09 | 1,11 |

Fuente: Autores

En la tabla 34 se presenta la suma de los datos de concentración para los tres humedales artificiales con su respectivo ciclo de la salida (efluente), el valor máximo y mínimo entre estos, el promedio y la desviación estándar del parámetro DBO.

En la tabla 35, se presentan cada uno de los modelos de regresión lineal para la variable DBO en los humedales 1, 2,3 y el humedal promedio con sus respectivos errores: error cuadrático, error promedio y error relativo porcentual como se muestra en la tabla 36.

Tabla 35. Modelos de regresión lineal para la variable DBO.

| HUMEDAL 1 | | | | | | | | | | | |
|------------------|------------------------|----------|-----------------------------|---------------|------------------------|----------|-----------------------------|----------------|------------------------|----------|-----------------------------|
| Modelo Brix | Residuales cuadráticos | Residual | Valor absoluto del residual | Modelo Knight | Residuales Cuadráticos | Residual | Valor absoluto del residual | Modelo Vymazal | Residuales cuadráticos | Residual | Valor absoluto del residual |
| 9,52 | 116,32 | 10,79 | 10,79 | 24,34 | 16,28 | -4,04 | 4,04 | 10,12 | 103,62 | 10,18 | 10,18 |
| 6,10 | 110,63 | 10,52 | 10,52 | 14,10 | 6,38 | 2,52 | 2,52 | 7,05 | 91,61 | 9,57 | 9,57 |
| 14,87 | 56,35 | 7,51 | 7,51 | 40,41 | 325,06 | -18,03 | 18,03 | 14,94 | 55,31 | 7,44 | 7,44 |
| HUMEDAL 2 | | | | | | | | | | | |
| Modelo Brix | Residuales cuadráticos | Residual | Valor absoluto del residual | Modelo Knight | Residuales Cuadráticos | Residual | Valor absoluto del residual | Modelo Vymazal | Residuales cuadráticos | Residual | Valor absoluto del residual |
| 15,22 | 168,12 | 12,97 | 12,97 | 41,46 | 176,15 | -13,27 | 13,27 | 15,26 | 167,22 | 12,93 | 12,93 |
| 7,98 | 446,69 | 21,14 | 21,14 | 19,72 | 88,27 | 9,40 | 9,40 | 8,73 | 415,16 | 20,38 | 20,38 |
| 13,84 | 114,96 | 10,72 | 10,72 | 37,30 | 162,41 | -12,74 | 12,74 | 14,01 | 111,28 | 10,55 | 10,55 |
| HUMEDAL 3 | | | | | | | | | | | |
| Modelo Brix | Residuales cuadráticos | Residual | Valor absoluto del residual | Modelo Knight | Residuales Cuadráticos | Residual | Valor absoluto del residual | Modelo Vymazal | Residuales cuadráticos | Residual | Valor absoluto del residual |
| 10,44 | 205,38 | 14,33 | 14,33 | 27,11 | 5,46 | -2,34 | 2,34 | 10,95 | 190,93 | 13,82 | 13,82 |
| 16,13 | 70,96 | 8,42 | 8,42 | 44,17 | 384,87 | -19,62 | 19,62 | 16,07 | 71,90 | 8,48 | 8,48 |
| 10,50 | 380,18 | 19,50 | 19,50 | 27,30 | 7,32 | 2,70 | 2,70 | 11,01 | 360,68 | 18,99 | 18,99 |
| HUMEDAL PROMEDIO | | | | | | | | | | | |
| Modelo Brix | Residuales cuadráticos | Residual | Valor absoluto del residual | Modelo Knight | Residuales Cuadráticos | Residual | Valor absoluto del residual | Modelo Vymazal | Residuales cuadráticos | Residual | Valor absoluto del residual |
| 11,73 | 161,14 | 12,69 | 12,69 | 30,97 | 42,88 | -6,55 | 6,55 | 12,11 | 151,53 | 12,31 | 12,31 |
| 10,07 | 178,47 | 13,36 | 13,36 | 25,99 | 6,58 | -2,57 | 2,57 | 10,62 | 164,07 | 12,81 | 12,81 |
| 13,07 | 158,15 | 12,58 | 12,58 | 35,00 | 87,54 | -9,36 | 9,36 | 13,32 | 151,93 | 12,33 | 12,33 |

Fuente: Autores

En la tabla anterior se observan cada uno de los modelos de regresión lineal para la variable DBO en los humedales artificiales analizados, más el humedal promedio. Los modelos de regresión lineal determinan una concentración predicha (C_{out}) contienen los datos experimentales de concentración de entrada (C_{in}) adicionalmente constantes estipuladas para cada modelo. En la tabla 5 se presenta el modelo que más se ajusta a los datos experimentales en campo para la variable DBO.

Tabla 36. Errores cuadráticos, errores promedios y errores relativos porcentuales de la variable DBO.

| MODELOS DE REGRESIÓN LINEAL | HUMEDAL 1 | | | HUMEDAL 2 | | | HUMEDAL 3 | | | HUMEDAL PROMEDIO | | |
|-----------------------------|-------------|---------------|----------------|-------------|---------------|----------------|-------------|---------------|----------------|------------------|---------------|----------------|
| | Modelo Brix | Modelo Knight | Modelo Vymazal | Modelo Brix | Modelo Knight | Modelo Vymazal | Modelo Brix | Modelo Knight | Modelo Vymazal | Modelo Brix | Modelo Knight | Modelo Vymazal |
| Error cuadrático | 283,30 | 347,71 | 250,55 | 729,77 | 426,82 | 693,66 | 656,53 | 397,64 | 623,51 | 497,75 | 137,00 | 467,52 |
| Error promedio | 28,81 | -19,54 | 27,19 | 44,82 | -16,62 | 43,86 | 42,25 | -19,25 | 41,29 | 38,63 | -18,47 | 37,44 |
| Error relativo porcentual | 48,58 | 41,47 | 45,85 | 54,76 | 43,26 | 53,57 | 53,27 | 31,09 | 52,05 | 52,56 | 25,13 | 50,95 |

Fuente: Autores

En la tabla anterior se presentan los diferentes errores para determinar el modelo de regresión lineal donde los datos experimentales mejor se ajustan.

Para la variable DBO el modelo de regresión lineal que obtuvo el valor mínimo en los diferentes errores determinados fue el modelo de Knight, sin embargo, en el humedal 1 el error cuadrático mínimo fue el modelo Vymazal. Para este humedal se asume que el mejor modelo debe ser el mínimo para todos los errores, por lo tanto, el modelo que mejor se ajusta a los datos es el modelo de knight.

En cuanto a los humedales 2 ,3 y humedal promedio los datos experimentales que mejor se ajustan al modelo de regresión lineal es al modelo de knight debido a que los diferentes errores determinados, son los valores mínimos en comparación con los demás modelos.

En la tabla 37, se presentan cada uno de los modelos de regresión lineal para la variable nitrógeno en los humedales 1, 2,3 y el humedal promedio con sus respectivos errores: error cuadrático, error promedio y error relativo porcentual como se muestra en la tabla 38.

Tabla 37. Modelos de regresión lineal para la variable nitrógeno.

| HUMEDAL 1 | | | | | | | |
|-------------------------|------------------------|----------|-----------------------------|----------------|------------------------|----------|-----------------------------|
| Modelo Kadlec et al | Residuales cuadraticos | Residual | Valor absoluto del residual | Modelo Vymazal | Residuales cuadraticos | Residual | Valor absoluto del residual |
| 55,62 | 10,1124 | 3,18 | 3,18 | 50,1 | 75,69 | 8,7 | 8,7 |
| 66,54 | 36,4816 | -6,04 | 6,04 | 58,92 | 2,4964 | 1,58 | 1,58 |
| HUMEDAL 2 | | | | | | | |
| Modelo Kadlec et al | Residuales cuadraticos | Residual | Valor absoluto del residual | Modelo Vymazal | Residuales cuadraticos | Residual | Valor absoluto del residual |
| 59,26 | 26,4196 | 5,14 | 5,14 | 53,04 | 129,0496 | 11,36 | 11,36 |
| 69,14 | 41,7316 | 6,46 | 6,46 | 61,02 | 212,5764 | 14,58 | 14,58 |
| HUMEDAL 3 | | | | | | | |
| Modelo Kadlec et al | Residuales cuadraticos | Residual | Valor absoluto del residual | Modelo Vymazal | Residuales cuadraticos | Residual | Valor absoluto del residual |
| 65,5 | 723,61 | 26,9 | 26,9 | 58,08 | 1177,86 | 34,32 | 34,32 |
| 72,26 | 180,6336 | 13,44 | 13,44 | 63,54 | 491,07 | 22,16 | 22,16 |
| HUMEDAL PROMEDIO | | | | | | | |
| Modelo Kadlec et al | Residuales cuadraticos | Residual | Valor absoluto del residual | Modelo Vymazal | Residuales cuadraticos | Residual | Valor absoluto del residual |
| 60,13 | 137,83 | 11,74 | 11,74 | 53,74 | 328,58 | 18,13 | 18,13 |
| 69,31 | 21,34 | 4,62 | 4,62 | 61,16 | 163,16 | 12,77 | 12,77 |

Fuente: Autores

En la tabla anterior se observan los modelos propuestos para la variable nitrógeno en los humedales artificiales tipo batch, con cada uno de los residuales cuadráticos, residual y valor absoluto del residual. Los modelos planteados para esta variable

son los de Kadlec et al y Vymazal, en la tabla 7 se presentan los diferentes errores para determinar que los datos experimentales se ajustan a cuál de los dos modelos anteriormente mencionados

Tabla 38. Errores cuadráticos, errores promedios y errores relativos porcentuales de la variable nitrógeno.

| | HUMEDAL 1 | | HUMEDAL 2 | | HUMEDAL 3 | | HUMEDAL PROMEDIO | |
|-----------------------------|---------------------|----------------|---------------------|----------------|---------------------|----------------|---------------------|----------------|
| MODELOS DE REGRESIÓN LINEAL | Modelo Kadlec et al | Modelo Vymazal | Modelo Kadlec et al | Modelo Vymazal | Modelo Kadlec et al | Modelo Vymazal | Modelo Kadlec et al | Modelo Vymazal |
| Error cuadrático | 46,59 | 78,19 | 68,15 | 341,63 | 904,24 | 1668,93 | 159,17 | 491,73 |
| Error promedio | -2,86 | 10,28 | 11,6 | 25,94 | 40,34 | 56,48 | 16,36 | 30,9 |
| Error relativo porcentual | 7,73 | 8,62 | 8,29 | 18,53 | 22,65 | 31,71 | 11,22 | 21,19 |

Fuente: Autores

Según la tabla anterior los datos experimentales se ajustan al modelo de Kadlec et al, en todos los humedales artificiales y el humedal promedio dando como valor mínimo con respecto a los diferentes errores.

En la tabla 39, se presentan cada uno de los modelos de regresión lineal para la variable fósforo en los humedales artificiales tipo batch y el humedal promedio con sus respectivos errores: error cuadrático, error promedio y error relativo porcentual como se muestra en la tabla 40.

Tabla 39. Modelos de regresión lineal para la variable Fósforo.

| HUMEDAL 1 | | | | | | | | | | | |
|--------------------------|------------------------|----------|-----------------------------|-------------|------------------------|----------|-----------------------------|----------------|------------------------|----------|-----------------------------|
| Modelo Kadlec and Knight | Residuales cuadráticos | Residual | Valor absoluto del residual | Modelo Brix | Residuales cuadráticos | Residual | Valor absoluto del residual | Modelo Vymazal | Residuales cuadráticos | Residual | Valor absoluto del residual |
| 5,65 | 8,95 | 2,99 | 2,99 | 6,50 | 4,60 | 2,15 | 2,15 | 3,83 | 23,10 | 4,81 | 4,81 |
| 6,00 | 4,01 | 2,00 | 2,00 | 6,82 | 1,39 | 1,18 | 1,18 | 3,96 | 16,29 | 4,04 | 4,04 |
| HUMEDAL 2 | | | | | | | | | | | |
| Modelo Kadlec and Knight | Residuales cuadráticos | Residual | Valor absoluto del residual | Modelo Brix | Residuales cuadráticos | Residual | Valor absoluto del residual | Modelo Vymazal | Residuales cuadráticos | Residual | Valor absoluto del residual |
| 5,86 | 4,17 | 2,04 | 2,04 | 6,69 | 1,46 | 1,21 | 1,21 | 3,91 | 15,90 | 3,99 | 3,99 |
| 9,22 | 0,03 | 0,18 | 0,18 | 9,75 | 0,12 | -0,35 | 0,35 | 5,13 | 18,20 | 4,27 | 4,27 |
| HUMEDAL 3 | | | | | | | | | | | |
| Modelo Kadlec and Knight | Residuales cuadráticos | Residual | Valor absoluto del residual | Modelo Brix | Residuales cuadráticos | Residual | Valor absoluto del residual | Modelo Vymazal | Residuales cuadráticos | Residual | Valor absoluto del residual |
| 6,03 | 6,59 | 2,57 | 2,57 | 6,85 | 3,05 | 1,75 | 1,75 | 3,98 | 21,37 | 4,62 | 4,62 |
| 6,14 | 7,63 | 2,76 | 2,76 | 6,95 | 3,80 | 1,95 | 1,95 | 4,02 | 23,85 | 4,88 | 4,88 |
| HUMEDAL PROMEDIO | | | | | | | | | | | |
| Modelo Kadlec and Knight | Residuales cuadráticos | Residual | Valor absoluto del residual | Modelo Brix | Residuales cuadráticos | Residual | Valor absoluto del residual | Modelo Vymazal | Residuales cuadráticos | Residual | Valor absoluto del residual |
| 5,85 | 6,42 | 2,53 | 2,53 | 6,68 | 2,89 | 1,70 | 1,70 | 3,91 | 20,00 | 4,47 | 4,47 |
| 7,11 | 2,76 | 1,66 | 1,66 | 7,84 | 0,86 | 0,93 | 0,93 | 4,37 | 19,32 | 4,40 | 4,40 |

Fuente: Autores

En la tabla anterior se evidencian los tres modelos para la variable fósforo en los humedales artificiales tipo batch, con los residuales cuadráticos, residual y el valor absoluto del residual según corresponda. Los modelos estipulados para esta variable son los de Kadlec et al, Brix y Vymazal. En la tabla 40 se observan cada

uno de los errores para determinar que los datos experimentales se ajustan alguno de los tres modelos anteriormente mencionados.

Tabla 40. Errores cuadráticos, errores promedios y errores relativos porcentuales de la variable Fósforo.

| MODELOS DE REGRESIÓN LINEAL | HUMEDAL 1 | | | HUMEDAL 2 | | | HUMEDAL 3 | | | HUMEDAL PROMEDIO | | |
|-----------------------------|--------------------------|-------------|----------------|--------------------------|-------------|----------------|--------------------------|-------------|----------------|--------------------------|-------------|----------------|
| | Modelo Kadlec and Knight | Modelo Brix | Modelo Vymazal | Modelo Kadlec and Knight | Modelo Brix | Modelo Vymazal | Modelo Kadlec and Knight | Modelo Brix | Modelo Vymazal | Modelo Kadlec and Knight | Modelo Brix | Modelo Vymazal |
| Error cuadrático | 12,96 | 5,99 | 39,39 | 4,20 | 1,58 | 34,10 | 14,21 | 6,86 | 45,23 | 9,18 | 3,75 | 39,32 |
| Error promedio | 4,99 | 3,33 | 8,84 | 2,22 | 0,87 | 8,25 | 5,33 | 3,70 | 9,51 | 4,19 | 2,63 | 8,87 |
| Error relativo porcentual | 30,01 | 19,98 | 53,14 | 12,83 | 8,99 | 47,71 | 30,45 | 21,13 | 54,33 | 24,46 | 15,33 | 51,72 |

Fuente: Autores

Para la tabla anteriormente mencionada se presentan los tres modelos analizados para la variable fósforo en los humedales artificiales tipo batch, donde el modelo de Brix es en el que los datos mejor se ajustan para el comportamiento de la variable analizar dentro de los humedales, se determinó por ser el mínimo valor con respecto a los demás errores en cada uno de los modelos propuestos.

5. CONCLUSIONES

- Mediante este proyecto se logró evaluar la capacidad de remoción de nitrógeno total, fósforo total, Coliformes totales y fecales, para un sistema de tres humedales artificiales con presencia de la especie (*Chrysopogon zizanioides*), en una vivienda rural ubicada en el municipio de Floridablanca. Encontrando el mayor porcentaje de remoción en el humedal dos en los ciclos evaluados para la mayoría de los parámetros con un rango entre 23.25-100%, excepto en nitrógeno.
- El análisis estadístico de las variables DBO y DQO un sistema de humedales artificiales se obtuvo por medio de los modelos de diseños de experimentos DCA y DBCA. El DCA permitió identificar que se presentaron diferencias significativas en la concentración de las variables entre los niveles o puntos de muestreo a través de la prueba Tuckey, presentando mayor diferencia significativa el nivel 0(afluente) y el nivel 3(efluente). En comparación con el DBCA arrojó que los humedales artificiales 1 y 2 fueron los que presentaron mayor diferencia significativa a través de la prueba de comparaciones múltiples, pero se escogió el humedal 2 como el más eficiente porque presentó mayor remoción de DBO y DQO con presencia de la especie *Chrysopogon zizanioides*.
- La cinética de remoción se estableció para los parámetros químicos en el sistema de humedales artificiales en la vivienda rural del municipio de Floridablanca. Las constantes de velocidad determinadas para las variables DQO (0.0439-0.5735), DBO (0.2507-0.3591), Nitrógeno (0.0133-0.2855) y fósforo (0.6227-0.8581).
- La determinación del ajuste de los resultados experimentales a los modelos matemáticos de regresión lineal propuestos en humedales artificiales, se evidenció eficientemente el planteamiento de estos por las hipótesis

correctamente planteadas, donde los datos experimentales de cada una de las variables DBO, Nitrógeno Total y Fósforo total se ajustaron a un modelo matemático diferente.

- Los datos experimentales se ajustaron correctamente a los modelos matemáticos de regresión lineal para la variable DBO, arrojando como resultado el modelamiento de la ecuación de Knight, así mismo la variable nitrógeno se adaptó a la ecuación Kadlec et al y finalmente la variable fósforo se adecuó a la ecuación de Brix. Para cada variable en todos los humedales se ajustó el mismo modelo matemático. Los modelos propuestos por Knight, Kadlec et al y Brix demostraron que a pesar de las condiciones ambientales en las que se establecieron inicialmente en zonas templadas, los resultados experimentales se ajustan a los modelos de regresión lineal en humedales tipo Bach con condiciones tropicales específicamente de la zona rural de Floridablanca- Santander.

6. RECOMENDACIONES

- Debido a que los porcentajes de remoción de Coliformes fecales en los humedales artificiales 1 y 3 no fueron significativos debido a la adaptación de los microorganismos en el medio por las condiciones ambientales, se sugiere que se lleve a cabo un análisis de los organismos del género *Streptococos* presentes en el agua residual ya que estos son más resistentes en los ambientes acuáticos en comparación con los organismos E.coli siendo así una muestra más representativa de remoción de organismos patógenos teniendo en cuenta que las descargas de agua residual en los humedales artificiales fueron intermitentes. (1)
- Para la obtención de la cinética de remoción en los humedales artificiales tipo batch es necesario aumentar el número de datos experimentales para cada variable analizada, con el fin que la constante de reacción arroje un valor más significativo que represente la velocidad de los diferentes procesos de degradación de la materia orgánica que se llevan a cabo en los humedales artificiales.
- Es necesario aumentar el número de datos experimentales por cada ciclo evaluado para un futuro estudio similar, con el fin de llevar a cabo un análisis estadístico de diseño de experimentos de todas las variables analizadas.
- Para determinar el ajuste de los datos experimentales en zona tropical a los modelos matemáticos estipulados para humedales artificiales en zonas templadas, es necesario medir todas las variables que contiene cada modelo matemático de regresión lineal que represente cada parámetro (DBO, N, P, DQO, SST)
- Para futuros estudios donde se evalúe la capacidad de remoción de variables químicas y biológicas del agua residual, es necesario evaluar al mismo

tiempo los humedales artificiales con la presencia de la especie *Chryzopogon zizanioides* y los blancos, con el fin de obtener un criterio de comparación más óptimo ya que se encontrarían en las mismas condiciones ambientales, es decir los tres humedales construidos con la especie y la construcción de otro humedal que serviría como control.

BIBLIOGRAFÍA

1. Delgadillo, O. (2010). Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales. Nelson Antequera.
2. VERTICOL. Humedales artificiales para tratamiento de aguas residuales. [En línea], 18 de marzo de 2019. Disponible en Internet: <https://bit.ly/30xXYLV>
3. ROJAS, Jairo Alberto Romero. Tratamiento de aguas residuales. Bogotá. Escuela Colombiana de Ingeniería, 2002
4. LOPEZ, Patricia. Depuración de las aguas residuales mediante humedales superficiales. [En línea], 18 de marzo de 2019. Disponible en Internet: <https://bit.ly/2EkjL0l>.
5. DELGADILLO LOPEZ, Angélica. FITORREMEDIACIÓN: UNA ALTERNATIVA PARA ELIMINAR LA CONTAMINACIÓN. SCIELO. [En línea], 18 de Marzo de 2019. Disponible en Internet: <https://bit.ly/2gAh1SF>
6. ORIHUELA, Julio Alegre. MANUAL SOBRE EL USO Y MANEJO DEL PASTO VETIVER ((Chrysopogonzizanioides). VETIVER. [En línea] 18 de marzo de 2019. Disponible en Internet: <https://bit.ly/2VyHgZ5>.
7. VETIVERCOL. Pasto Vetiver. [En línea], 18 de marzo de 2019. Disponible en Internet: <https://bit.ly/2HFUFcT>.
8. Blog vetiver Puerto Rico. UNA TECNOLOGIA VERDE AL ALCALCE DE TODOS. [En línea] 19 de marzo de 2019. Disponible en Internet: <https://bit.ly/2Vy2R43>.

9. VETIVERCOL. Tratamiento de Aguas Residuales y Rellenos Sanitarios con Tecnología Pasto Vetiver. [En línea], 18 de marzo de 2019. Disponible en Internet: <https://bit.ly/2LSmPa1>.
10. CALVO, Mariano Seoáñez. AGUAS RESIDUALES: TRATAMIENTO POR HUMEDALES ARTIFICIALES. Madrid, ESPAÑA. Mundi-Prensa Libros, s.a, 1999.
11. BROCK. Biología de los microorganismos. Madrid, ESPAÑA. Mundi-Prensa Libros, s.a, 2011.
12. LEAL, Gladys Rocío Gonzáles. Microbiología del agua. Medellín : Escuela Colombiana de Ingeniería, 2012.
13. CIRELLI, Dra. Alicia Fernández. Agua potable para comunidades rurales, reuso y tratamientos avanzados de aguas residuales domesticas. Buenos Aires. Red Iberoamericana de Potabilización y Depuración del Agua, 2001. 225-227 p.
14. RODRÍGUEZ OTÁLORA, Alejandra Patricia. Evaluación del sistema de tratamiento de aguas residuales domésticas mediante humedales artificiales de alta tasa en la locación petrolera de Caño Gandúl. [En línea] 19 de marzo de 2019. Disponible en Internet <https://bit.ly/2VNslIN>
15. ROLDÁN, Paula Nicole. Modelo Matemático. Economipedia. [En línea] 19 de marzo de 2019. Disponible en Internet: <https://bit.ly/2WRHtZ5>.

16. DIEDERIK P.L. Rousseau, Peter A. Model-based design of horizontal subsurface flow constructed. ESEVIER. [En línea], 19 de marzo de 2019. Disponible en Internet: <https://bit.ly/2Vzo39E>.
17. OTERO, José Vicéns, HERRARTE, Ainhoa. Analisis de la varianza (ANOVA). [En línea], 19 de marzo de 2019. Disponible en Internet: <https://bit.ly/2VumU3f>.
18. BOQUÉ, Ricard, MAROTO, Alicia. EL ANÁLISIS DE LA VARIANZA (ANOVA). [En línea], 19 de marzo de 2019. Disponible en Internet: <https://bit.ly/2IYHpiS>.
19. GUTIERREZ, Humberto, SALAZAR, Román de la Vara. ANÁLISIS Y DISEÑO DE EXPERIMENTOS. Mexico. McGraw-Hill. 2008. Segunda edición.
20. IDEAM. Metodologías de Análisis. [En línea], 19 de marzo de 2019. Disponible en Internet: <https://bit.ly/2JrUuW5>.
21. SALAZAR, Humberto Gutierrez, PULIDO, Román de la Vara. Op. Cit. p. 64
22. Blog vetiver Puerto Rico. Op cit. p.2
23. DIEDERIK P.L. Rousseau, Peter A. Model-based design of horizontal subsurface flow constructed. ESEVIER. [En línea], 19 de marzo de 2019. Disponible en Internet: <https://bit.ly/2Vzo39E>
24. PACHECO, Jani, VARGAS, Luis. Biorremediación de residuos industriales (aceites y grasas) mediante un contactor biológico rotativo con biopelículas formadas por cepas nativas de planococcus SP. México. 2015

25. ROMERO, Mariana, COLÍN, Arturo. Tratamiento de aguas residuales por un sistema piloto de humedales artificiales: evaluación de la remoción de la carga orgánica. México. 2009. Universidad Autónoma del Estado de México.
26. BARBA, Luz Edith. Conceptos básicos de la contaminación del agua y parámetros de medición. Universidad del Valle. Cali, COLOMBIA. 2002.
27. LARA, Jaime Andrés. Depuración de aguas residuales municipales con humedales Artificiales. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona, ESPAÑA. 1999.
28. VILLASEÑOR, José. Eliminación biológica de fósforo en aguas residuales urbanas. Universidad de Castilla-La Mancha. Ciudad Real, ESPAÑA. 1998.
29. CAMPOS, Elena, PALASI, Jordi. Guía de los tratamientos de las deyecciones ganaderas. Generalitat de Catalunya. ESPAÑA. 2004
30. Camacho, J. V. (2001). Op. Cit. Eliminación biológica de fósforo en aguas residuales urbanas (Vol. 122). Univ de Castilla La Mancha.
31. Delgadillo, O. (2010). Op. Cit. p. 62 Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales. Nelson Antequera.
32. RODRÍGUEZ OTÁLORA, Alejandra Patricia. Op. Cit. p.89
33. Zuñiga, M. A. G. 6. REMOCIÓN DE NITRÓGENO Y FÓSFORO. México. 2005

ANEXO A

Figura 1. Envases para toma de muestras



Fuente: Autores

Figura 2. Material, equipo de muestro y análisis de las muestras de agua residual.



Fuente: Autores

Tabla 1. Se presenta los datos de concentración experimentales del humedal 1 para cada ciclo evaluado en los puntos de muestreo de la variable DBO.

| HUMEDAL 1 | | | | | | | | | |
|-----------|------------|-------------|--------------|----------|-------|-------|-------|------|----------|
| DBO | | | | | | | | | |
| Ciclos | Entrada Co | Cmpuesta C1 | Compuesta C2 | Salida C | Ln Co | Ln C1 | Ln C2 | Ln C | Promedio |
| Ciclo 1 | 69,5 | 24 | 28,66 | 20,3 | 4,24 | 3,18 | 3,36 | 3,01 | 3,18 |
| Ciclo 2 | 38,47 | 34,9 | 30,72 | 16,62 | 3,65 | 3,55 | 3,42 | 2,81 | 3,26 |
| Ciclo 3 | 118,21 | 20,01 | 21,05 | 22,38 | 4,77 | 3,00 | 3,05 | 3,11 | 3,05 |

Fuente: Autores

Tabla 2. Se presenta los datos de concentración experimentales del humedal 1 para cada ciclo evaluado en los puntos de muestreo de la variable Nitrógeno.

| HUMEDAL 1 | | | | |
|------------------|-------------------|-----------------|--------------|-------------|
| Nitrógeno | | | | |
| Ciclos | Entrada Co | Salida C | Ln Co | Ln C |
| Ciclo 1 | 101 | 58,8 | 4,62 | 4,07 |
| Ciclo 2 | 122 | 60,5 | 4,80 | 4,10 |

Fuente: Autores

Tabla 3. Se presenta los datos de concentración experimentales del humedal 1 para cada ciclo evaluado en los puntos de muestreo de la variable Fósforo.

| HUMEDAL 1 | | | | |
|------------------|-------------------|-----------------|--------------|-------------|
| Fósforo | | | | |
| Ciclos | Entrada Co | Salida C | Ln Co | Ln C |
| Ciclo 1 | 8,9 | 8,64 | 2,19 | 2,16 |
| Ciclo 2 | 9,4 | 8 | 2,24 | 2,08 |

Fuente: Autores

Tabla 4. Se presenta los datos de concentración experimentales del humedal 2 para cada ciclo evaluado en los puntos de muestreo de la variable DQO.

| HUMEDAL 2 | | | | | | | | | |
|------------------|-------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------|--------------|--------------|--------------|-------------|-----------------|
| DQO | | | | | | | | | |
| Ciclos | Entrada Co | Compuesto a C1 | Compuesto a C2 | Salida C | Ln Co | Ln C1 | Ln C2 | Ln C | Promedio |
| Ciclo 1 | 310 | 208 | 124 | 192 | 5,74 | 5,34 | 4,82 | 5,26 | 5,14 |
| Ciclo 2 | 272 | 113 | 148 | 160 | 5,61 | 4,73 | 5,00 | 5,08 | 4,93 |
| Ciclo 3 | 400 | 176 | 166,4 | 160 | 5,99 | 5,17 | 5,11 | 5,08 | 5,12 |

Fuente: Autores

Tabla 5. Se presenta los datos de concentración experimentales del humedal 2 para cada ciclo evaluado en los puntos de muestreo de la variable DBO.

| HUMEDAL 2 | | | | | | | | | |
|------------------|-------------------|---------------------|---------------------|-----------------|--------------|--------------|--------------|-------------|-----------------|
| DBO | | | | | | | | | |
| Ciclos | Entrada Co | Compuesta C1 | Compuesta C2 | Salida C | Ln Co | Ln C1 | Ln C2 | Ln C | Promedio |
| Ciclo 1 | 121,4 | 48,7 | 35,18 | 28,19 | 4,80 | 3,89 | 3,56 | 3,34 | 3,60 |
| Ciclo 2 | 55,5 | 23,5 | 39,4 | 29,11 | 4,02 | 3,16 | 3,67 | 3,37 | 3,40 |
| Ciclo 3 | 108,8 | 38,11 | 25,71 | 24,56 | 4,69 | 3,64 | 3,25 | 3,20 | 3,36 |

Fuente: Autores

Tabla 6. Se presenta los datos de concentración experimentales del humedal 2 para cada ciclo evaluado en los puntos de muestreo de la variable Nitrógeno.

| HUMEDAL 2 | | | | |
|------------------|-------------------|-----------------|--------------|-------------|
| Nitrógeno | | | | |
| Ciclos | Entrada Co | Salida C | Ln Co | Ln C |
| Ciclo 1 | 108 | 64,4 | 4,68 | 4,17 |
| Ciclo 2 | 127 | 75,6 | 4,84 | 4,33 |

Fuente: Autores

Tabla 7. Se presenta los datos de concentración experimentales del humedal 2 para cada ciclo evaluado en los puntos de muestreo de la variable Fósforo.

| HUMEDAL 2 | | | | |
|------------------|-------------------|-----------------|--------------|-------------|
| Fósforo | | | | |
| | Entrada Co | Salida C | Ln Co | Ln C |
| Ciclo 1 | 9,2 | 7,9 | 2,22 | 2,07 |
| Ciclo 2 | 13,9 | 9,4 | 2,63 | 2,24 |

Fuente: Autores

Tabla 8. Se presenta los datos de concentración experimentales del humedal 3 para cada ciclo evaluado en los puntos de muestreo de la variable DQO.

| HUMEDAL 3 | | | | | | | | | |
|------------------|-------------------|---------------------|---------------------|-----------------|--------------|--------------|--------------|-------------|-----------------|
| DQO | | | | | | | | | |
| | Entrada Co | Compuesta C1 | Compuesta C2 | Salida C | Ln Co | Ln C1 | Ln C2 | Ln C | Promedio |
| Ciclo 1 | 274 | 128 | 90 | 144 | 5,61 | 4,85 | 4,50 | 4,97 | 4,77 |
| Ciclo 2 | 323 | 176 | 160 | 150,4 | 5,78 | 5,17 | 5,08 | 5,01 | 5,09 |
| Ciclo 3 | 262,4 | 128 | 144 | 160 | 5,57 | 4,85 | 4,97 | 5,08 | 4,97 |

Fuente: Autores

Tabla 9. Se presenta los datos de concentración experimentales del humedal 3 para cada ciclo evaluado en los puntos de muestreo de la variable DBO.

| HUMEDAL 3 | | | | | | | | | |
|------------------|-------------------|---------------------|---------------------|-----------------|--------------|--------------|--------------|-------------|-----------------|
| DBO | | | | | | | | | |
| Ciclos | Entrada Co | Compuesta C1 | Compuesta C2 | Salida C | Ln Co | Ln C1 | Ln C2 | Ln C | Promedio |
| Ciclo 1 | 77,9 | 29,19 | 16,6 | 24,77 | 4,36 | 3,37 | 2,81 | 3,21 | 3,13 |
| Ciclo 2 | 129,6 | 39,65 | 27,05 | 24,55 | 4,86 | 3,68 | 3,30 | 3,20 | 3,39 |
| Ciclo 3 | 78,47 | 36,87 | 35,11 | 30 | 4,36 | 3,61 | 3,56 | 3,40 | 3,52 |

Fuente: Autores

Tabla 10. Se presenta los datos de concentración experimentales del humedal 3 para cada ciclo evaluado en los puntos de muestreo de la variable Nitrógeno.

| HUMEDAL 3 | | | | |
|------------------|-------------------|-----------------|--------------|-------------|
| Nitrógeno | | | | |
| Ciclos | Entrada Co | Salida C | Ln Co | Ln C |
| Ciclo 1 | 120 | 92,4 | 4,79 | 4,53 |
| Ciclo 2 | 133 | 85,7 | 4,89 | 4,45 |
| Ciclo 3 | 93,8 | 79,8 | 4,54 | 4,38 |

Fuente: Autores

Tabla 11. Se presenta los datos de concentración experimentales del humedal 3 para cada ciclo evaluado en los puntos de muestreo de la variable Fósforo.

| HUMEDAL 3 | | | | |
|------------------|-------------------|-----------------|--------------|-------------|
| Fósforo | | | | |
| Ciclos | Entrada Co | Salida C | Ln Co | Ln C |
| Ciclo 1 | 9,45 | 8,6 | 2,25 | 2,15 |
| Ciclo 2 | 9,6 | 8,9 | 2,26 | 2,19 |
| Ciclo 3 | 9,4 | 8,28 | 2,24 | 2,11 |

Fuente: Autores

ANEXOS B

Tabla 1. Datos de concentración de la entrada para las variables Nitrógeno de los humedales artificiales tipo batch con el humedal promedio.

| INFORMACIÓN DE ENTRADA | | | | | | | |
|------------------------|-----|----------|---------|-----------|-----------|-----------|------------------|
| CICLO | DÍA | VARIABLE | LUGAR | HUMEDAL 1 | HUMEDAL 2 | HUMEDAL 3 | HUMEDAL PROMEDIO |
| 1 | 0 | N | Entrada | 101 | 108 | 120 | 109,67 |
| 2 | 0 | N | Entrada | 122 | 127 | 133 | 127,33 |

Fuente: Autores

Tabla 2. Datos de concentración de la entrada para la variable Fósforo de los humedales artificiales tipo batch con el humedal promedio.

| INFORMACIÓN DE ENTRADA | | | | | | | |
|------------------------|-----|----------|---------|-----------|-----------|-----------|------------------|
| CICLO | DÍA | VARIABLE | LUGAR | HUMEDAL 1 | HUMEDAL 2 | HUMEDAL 3 | HUMEDAL PROMEDIO |
| 1 | 0 | P | Entrada | 8,9 | 9,2 | 9,45 | 9,18 |
| 2 | 0 | P | Entrada | 9,4 | 13,9 | 9,6 | 10,97 |

Fuente: Autores

Tabla 3. Datos de concentración de la salida para la variable nitrógeno de los humedales artificiales tipo batch con el humedal promedio.

| INFORMACIÓN DE SALIDA | | | | | | | |
|-----------------------|-----|----------|--------|-----------|-----------|-----------|------------------|
| CICLO | DÍA | VARIABLE | LUGAR | HUMEDAL 1 | HUMEDAL 2 | HUMEDAL 3 | HUMEDAL PROMEDIO |
| 1 | 11 | N | Salida | 58,8 | 64,4 | 92,4 | 71,87 |
| 2 | 11 | N | Salida | 60,5 | 75,6 | 85,7 | 73,93 |

Fuente: Autores

Tabla 4. Datos de concentración de la salida para la variable fósforo de los humedales artificiales tipo batch con el humedal promedio.

| INFORMACIÓN DE SALIDA | | | | | | | |
|-----------------------|-----|----------|--------|-----------|-----------|-----------|------------------|
| CICLO | DÍA | VARIABLE | LUGAR | HUMEDAL 1 | HUMEDAL 2 | HUMEDAL 3 | HUMEDAL PROMEDIO |
| 1 | 11 | P | Salida | 8,64 | 7,9 | 8,6 | 8,38 |
| 2 | 11 | P | Salida | 8 | 9,4 | 8,9 | 8,77 |

Fuente: Autores

Tabla 5. Suma, máximo, mínimo, promedio y desviación estándar para la variable Nitrógeno de los humedales artificiales tipo batch.

| | | | | |
|---------------------|-------|------|-------|-------|
| SUMA | 119,3 | 140 | 178,1 | 145,8 |
| MAXIMO | 60,5 | 75,6 | 92,4 | 76,17 |
| MINIMO | 58,8 | 64,4 | 85,7 | 71,87 |
| PROMEDIO | 59,65 | 70 | 89,05 | 72,9 |
| DESVIACIÓN ESTANDAR | 1,20 | 7,92 | 4,74 | 1,46 |

Fuente: Autores

Tabla 6. Suma, máximo, mínimo, promedio y desviación estándar para la variable Fósforo de los humedales artificiales tipo batch.

| | | | | |
|----------------------------|-------|------|------|-------|
| SUMA | 16,64 | 17,3 | 17,5 | 17,15 |
| MAXIMO | 8,64 | 9,4 | 8,9 | 8,77 |
| MINIMO | 8 | 7,9 | 8,6 | 8,38 |
| PROMEDIO | 8,32 | 8,65 | 8,75 | 8,57 |
| DESVIACIÓN ESTANDAR | 0,45 | 1,06 | 0,21 | 0,27 |

Fuente: Autores