

| | | |
|---|---|-----------------------------|
|  | MACROPROCESO DE APOYO | CÓDIGO: AAAr113 |
| | PROCESO GESTIÓN APOYO ACADÉMICO | VERSIÓN: 3 |
| | DESCRIPCIÓN, AUTORIZACIÓN Y LICENCIA DEL REPOSITORIO INSTITUCIONAL | VIGENCIA: 2017-11-16 |
| | | PAGINA: 1 de 6 |

16.

| | |
|--------------|------------------------------|
| FECHA | Viernes, 15 de marzo de 2019 |
|--------------|------------------------------|

Señores
UNIVERSIDAD DE CUNDINAMARCA
 BIBLIOTECA
 Ciudad

| | |
|---|------------------------|
| UNIDAD REGIONAL | Extensión Facatativá |
| TIPO DE DOCUMENTO | Trabajo De Grado |
| FACULTAD | Ciencias Agropecuarias |
| NIVEL ACADÉMICO DE FORMACIÓN O PROCESO | Pregrado |
| PROGRAMA ACADÉMICO | Ingeniería Ambiental |

El Autor(Es):

| APELLIDOS COMPLETOS | NOMBRES COMPLETOS | No. DOCUMENTO DE IDENTIFICACIÓN |
|----------------------------|--------------------------|--|
| LARA MENDIVELSO | JULIE ANDREA | 1'075.873.566 |
| SUÁREZ MALAGÓN | ANDRÉS JOSÉ | 1'075.666.242 |
| | | |
| | | |
| | | |

| | | |
|---|---|-----------------------------|
|  | MACROPROCESO DE APOYO | CÓDIGO: AAAR113 |
| | PROCESO GESTIÓN APOYO ACADÉMICO | VERSIÓN: 3 |
| | DESCRIPCIÓN, AUTORIZACIÓN Y LICENCIA DEL REPOSITORIO INSTITUCIONAL | VIGENCIA: 2017-11-16 |
| | | PAGINA: 2 de 6 |

Director(Es) y/o Asesor(Es) del documento:

| APELLIDOS COMPLETOS | NOMBRES COMPLETOS |
|----------------------------|--------------------------|
| Castañeda Rodríguez | Luz Jaddy |
| Casas Cortés | Paula Andrea |
| | |
| | |

| TÍTULO DEL DOCUMENTO |
|--|
| DESARROLLO Y VALIDACIÓN DE UN MODELO MATEMÁTICO PARA LA CAPACIDAD DE ABSORCIÓN DE MATERIA ORGÁNICA DE LA MACRÓFITA <i>EICHHORNIA CRASSIPES</i> EN EL SECTOR EL ESPINO- RÍO BOGOTÁ PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE TIBITOC. |

| SUBTÍTULO (Aplica solo para Tesis, Artículos Científicos, Disertaciones, Objetos Virtuales de Aprendizaje) |
|--|
| |

| TRABAJO PARA OPTAR AL TÍTULO DE: Aplica para Tesis/Trabajo de Grado/Pasantía |
|--|
| Ingeniero Ambiental |

| AÑO DE EDICIÓN DEL DOCUMENTO | NÚMERO DE PÁGINAS |
|-------------------------------------|--------------------------|
| 15/03/2019 | 94 |

| DESCRIPTORES O PALABRAS CLAVES EN ESPAÑOL E INGLÉS (Usar 6 descriptores o palabras claves) | |
|--|-----------------------------|
| ESPAÑOL | INGLÉS |
| 1. Absorción de materia orgánica | Absorption organic matter |
| 2. Buchón de Agua | Water Hyacinth |
| 3. <i>Eichhornia crassipes</i> | <i>Eichhornia crassipes</i> |
| 4. Macrófita | Macrophyte |
| 5. Modelo matemático | Mathematical model |
| 6. Río Bogotá | Río Bogotá |

Calle 14 Avenida 15 Barrio Berlín Facatativá - Cundinamarca
Teléfono (091) 8920707-8920709-8920706 Línea Gratuita 018000180414
www.ucundinamarca.edu.co E-mail: info@ucundinamarca.edu.co
NIT: 890.680.062-2

Documento controlado por el Sistema de Gestión de la Calidad
Asegúrese que corresponde a la última versión consultando el Portal Institucional



| | |
|---|-----------------------------|
| MACROPROCESO DE APOYO | CÓDIGO: AAAr113 |
| PROCESO GESTIÓN APOYO ACADÉMICO | VERSIÓN: 3 |
| DESCRIPCIÓN, AUTORIZACIÓN Y LICENCIA DEL REPOSITORIO INSTITUCIONAL | VIGENCIA: 2017-11-16 |
| | PAGINA: 3 de 6 |

RESUMEN DEL CONTENIDO EN ESPAÑOL E INGLÉS

(Máximo 250 palabras – 1530 caracteres, aplica para resumen en español):

La Planta de Tratamiento de Agua Potable- PTAP Tibitoc se abastece en gran medida por el Río Bogotá a través de dos bocatomas ubicadas en el sector el Espino. Allí es evidente el desarrollo incontrolado de la macrófita *Eichhornia crassipes* atribuido al constante aporte de carga de nutrientes y materia orgánica aguas arriba de la cuenca, lo cual genera problemas en la dinámica ecosistémica del cuerpo de agua, así como en la calidad del recurso que abastece a la planta. En este estudio, se evalúa la capacidad de absorción de materia orgánica de la especie, mediante el desarrollo y la validación del modelo matemático de Malthus y del modelo logístico de Verhulst, a partir de la evaluación de la biomasa, densidad, DBO₅ y DQO las cuales presentan un mismo comportamiento favoreciendo el análisis de los resultados y permitiendo estimar que la remoción de la población de la especie *Eichhornia crassipes* debe efectuarse a partir del día 77 para que sea efectivo el proceso de remoción de materia orgánica y con esto disminuir la cantidad de material que ingresa a la dársena de pre sedimentación, siempre y cuando esta actividad no supere el día 165 considerado este como el periodo en el cual la población del Buchón de Agua colmata el sistema generando consigo impactos negativos al recurso hídrico.

The Potable Water Treatment Plant- PTAP Tibitoc is largely supplied by the Río Bogotá through two intakes located in the sector El Espino. There is evident the uncontrolled development of the macrophyte *Eichhornia crassipes* attributed to the constant contribution of nutrients and organic matter load upstream of the basin, which generates problems in the ecosystem dynamics of the body of water, as well as in the quality of the resource that supplies to the plant. In this study, the absorption capacity of organic matter of the species is evaluated through the development and validation of the mathematical model of Malthus and the Verhulst logistic model, based on the evaluation of biomass, density, BOD5 and COD. which present the same behavior favoring the analysis of the results and allowing to estimate that the removal of the population of the species *Eichhornia crassipes* should be carried out from day 77 so that the process of removal of organic matter is effective and with this decrease the amount of material that enters the pre-sedimentation basin, as long as this activity does not exceed the 165th day considered as the period in which the population of the Water Hyacinth clogs the system, generating negative impacts on the water resource.

AUTORIZACION DE PUBLICACIÓN

Por medio del presente escrito autorizo (Autorizamos) a la Universidad de Cundinamarca para que, en desarrollo de la presente licencia de uso parcial, pueda ejercer sobre mí (nuestra) obra las atribuciones que se indican a continuación, teniendo en cuenta que, en cualquier caso, la finalidad perseguida será facilitar, difundir y promover el aprendizaje, la enseñanza y la investigación.

Calle 14 Avenida 15 Barrio Berlín Facatativá - Cundinamarca
Teléfono (091) 8920707-8920709-8920706 Línea Gratuita 018000180414
www.ucundinamarca.edu.co E-mail: info@ucundinamarca.edu.co
NIT: 890.680.062-2

Documento controlado por el Sistema de Gestión de la Calidad
Asegúrese que corresponde a la última versión consultando el Portal Institucional



| | |
|---|-----------------------------|
| MACROPROCESO DE APOYO | CÓDIGO: AAAr113 |
| PROCESO GESTIÓN APOYO ACADÉMICO | VERSIÓN: 3 |
| DESCRIPCIÓN, AUTORIZACIÓN Y LICENCIA DEL REPOSITORIO INSTITUCIONAL | VIGENCIA: 2017-11-16 |
| | PAGINA: 4 de 6 |

En consecuencia, las atribuciones de usos temporales y parciales que por virtud de la presente licencia se autoriza a la Universidad de Cundinamarca, a los usuarios de la Biblioteca de la Universidad; así como a los usuarios de las redes, bases de datos y demás sitios web con los que la Universidad tenga perfeccionado una alianza, son: Marque con una "X":

| AUTORIZO (AUTORIZAMOS) | SI | NO |
|--|-----------|-----------|
| 1. La reproducción por cualquier formato conocido o por conocer. | | X |
| 2. La comunicación pública por cualquier procedimiento o medio físico o electrónico, así como su puesta a disposición en Internet. | | X |
| 3. La inclusión en bases de datos y en sitios web sean éstos onerosos o gratuitos, existiendo con ellos previa alianza perfeccionada con la Universidad de Cundinamarca para efectos de satisfacer los fines previstos. En este evento, tales sitios y sus usuarios tendrán las mismas facultades que las aquí concedidas con las mismas limitaciones y condiciones. | | X |
| 4. La inclusión en el Repositorio Institucional. | | X |

De acuerdo con la naturaleza del uso concedido, la presente licencia parcial se otorga a título gratuito por el máximo tiempo legal colombiano, con el propósito de que en dicho lapso mi (nuestra) obra sea explotada en las condiciones aquí estipuladas y para los fines indicados, respetando siempre la titularidad de los derechos patrimoniales y morales correspondientes, de acuerdo con los usos honrados, de manera proporcional y justificada a la finalidad perseguida, sin ánimo de lucro ni de comercialización.

Para el caso de las Tesis, Trabajo de Grado o Pasantía, de manera complementaria, garantizo(garantizamos) en mi(nuestra) calidad de estudiante(s) y por ende autor(es) exclusivo(s), que la Tesis, Trabajo de Grado o Pasantía en cuestión, es producto de mi(nuestra) plena autoría, de mi(nuestro) esfuerzo personal intelectual, como consecuencia de mi(nuestra) creación original particular y, por tanto, soy(somos) el(los) único(s) titular(es) de la misma. Además, aseguro (aseguramos) que no contiene citas, ni transcripciones de otras obras protegidas, por fuera de los límites autorizados por la ley, según los usos honrados, y en proporción a los fines previstos; ni tampoco contempla declaraciones difamatorias contra terceros; respetando el derecho a la imagen, intimidad, buen nombre y demás derechos constitucionales. Adicionalmente, manifiesto (manifestamos) que no se incluyeron expresiones contrarias al orden público ni a las buenas costumbres. En consecuencia, la responsabilidad directa en la elaboración, presentación, investigación y, en general, contenidos de la Tesis o Trabajo de Grado es de mí (nuestra) competencia exclusiva, eximiendo de toda responsabilidad a la Universidad de Cundinamarca por tales aspectos.

Calle 14 Avenida 15 Barrio Berlín Facatativá - Cundinamarca
Teléfono (091) 8920707-8920709-8920706 Línea Gratuita 018000180414
www.ucundinamarca.edu.co E-mail: info@ucundinamarca.edu.co
NIT: 890.680.062-2



| | |
|---|-----------------------------|
| MACROPROCESO DE APOYO | CÓDIGO: AAAr113 |
| PROCESO GESTIÓN APOYO ACADÉMICO | VERSIÓN: 3 |
| DESCRIPCIÓN, AUTORIZACIÓN Y LICENCIA DEL REPOSITORIO INSTITUCIONAL | VIGENCIA: 2017-11-16 |
| | PAGINA: 5 de 6 |

Sin perjuicio de los usos y atribuciones otorgadas en virtud de este documento, continuaré (continuaremos) conservando los correspondientes derechos patrimoniales sin modificación o restricción alguna, puesto que, de acuerdo con la legislación colombiana aplicable, el presente es un acuerdo jurídico que en ningún caso conlleva la enajenación de los derechos patrimoniales derivados del régimen del Derecho de Autor.

De conformidad con lo establecido en el artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, “*Los derechos morales sobre el trabajo son propiedad de los autores*”, los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables. En consecuencia, la Universidad de Cundinamarca está en la obligación de RESPETARLOS Y HACERLOS RESPETAR, para lo cual tomará las medidas correspondientes para garantizar su observancia.

NOTA: (Para Tesis, Trabajo de Grado o Pasantía):

Información Confidencial:

Esta Tesis, Trabajo de Grado o Pasantía, contiene información privilegiada, estratégica, secreta, confidencial y demás similar, o hace parte de la investigación que se adelanta y cuyos resultados finales no se han publicado.

SI NO .

En caso afirmativo expresamente indicaré (indicaremos), en carta adjunta tal situación con el fin de que se mantenga la restricción de acceso.

LICENCIA DE PUBLICACIÓN

Como titular(es) del derecho de autor, confiero(erimos) a la Universidad de Cundinamarca una licencia no exclusiva, limitada y gratuita sobre la obra que se integrará en el Repositorio Institucional, que se ajusta a las siguientes características:

a) Estará vigente a partir de la fecha de inclusión en el repositorio, por un plazo de 5 años, que serán prorrogables indefinidamente por el tiempo que dure el derecho patrimonial del autor. El autor podrá dar por terminada la licencia solicitándolo a la Universidad por escrito. (Para el caso de los Recursos Educativos Digitales, la Licencia de Publicación será permanente).

b) Autoriza a la Universidad de Cundinamarca a publicar la obra en formato y/o soporte digital, conociendo que, dado que se publica en Internet, por este hecho circula con un alcance mundial.

c) Los titulares aceptan que la autorización se hace a título gratuito, por lo tanto, renuncian a recibir beneficio alguno por la publicación, distribución, comunicación



| | |
|---|-----------------------------|
| MACROPROCESO DE APOYO | CÓDIGO: AAAR113 |
| PROCESO GESTIÓN APOYO ACADÉMICO | VERSIÓN: 3 |
| DESCRIPCIÓN, AUTORIZACIÓN Y LICENCIA DEL REPOSITORIO INSTITUCIONAL | VIGENCIA: 2017-11-16 |
| | PAGINA: 6 de 6 |

pública y cualquier otro uso que se haga en los términos de la presente licencia y de la licencia de uso con que se publica.

d) El(Los) Autor(es), garantizo(amos) que el documento en cuestión, es producto de mi(nuestra) plena autoría, de mi(nuestro) esfuerzo personal intelectual, como consecuencia de mi (nuestra) creación original particular y, por tanto, soy(somos) el(los) único(s) titular(es) de la misma. Además, aseguro(aseguramos) que no contiene citas, ni transcripciones de otras obras protegidas, por fuera de los límites autorizados por la ley, según los usos honrados, y en proporción a los fines previstos; ni tampoco contempla declaraciones difamatorias contra terceros; respetando el derecho a la imagen, intimidad, buen nombre y demás derechos constitucionales. Adicionalmente, manifiesto (manifestamos) que no se incluyeron expresiones contrarias al orden público ni a las buenas costumbres. En consecuencia, la responsabilidad directa en la elaboración, presentación, investigación y, en general, contenidos es de mí (nuestro) competencia exclusiva, eximiendo de toda responsabilidad a la Universidad de Cundinamarca por tales aspectos.

e) En todo caso la Universidad de Cundinamarca se compromete a indicar siempre la autoría incluyendo el nombre del autor y la fecha de publicación.

f) Los titulares autorizan a la Universidad para incluir la obra en los índices y buscadores que estimen necesarios para promover su difusión.

g) Los titulares aceptan que la Universidad de Cundinamarca pueda convertir el documento a cualquier medio o formato para propósitos de preservación digital.

h) Los titulares autorizan que la obra sea puesta a disposición del público en los términos autorizados en los literales anteriores bajo los límites definidos por la universidad en el “Manual del Repositorio Institucional AAAM003”

i) Para el caso de los Recursos Educativos Digitales producidos por la Oficina de Educación Virtual, sus contenidos de publicación se rigen bajo la Licencia Creative Commons: Atribución- No comercial- Compartir Igual.



j) Para el caso de los Artículos Científicos y Revistas, sus contenidos se rigen bajo la Licencia Creative Commons Atribución- No comercial- Sin derivar.



| | | |
|---|---|-----------------------------|
|  | MACROPROCESO DE APOYO | CÓDIGO: AAAr113 |
| | PROCESO GESTIÓN APOYO ACADÉMICO | VERSIÓN: 3 |
| | DESCRIPCIÓN, AUTORIZACIÓN Y LICENCIA DEL REPOSITORIO INSTITUCIONAL | VIGENCIA: 2017-11-16 |
| | | PAGINA: 7 de 7 |

Nota:

Si el documento se basa en un trabajo que ha sido patrocinado o apoyado por una entidad, con excepción de Universidad de Cundinamarca, los autores garantizan que se ha cumplido con los derechos y obligaciones requeridos por el respectivo contrato o acuerdo.

La obra que se integrará en el Repositorio Institucional, está en el(los) siguiente(s) archivo(s).

| Nombre completo del Archivo Incluida su Extensión (Ej. PerezJuan2017.pdf) | Tipo de documento (ej. Texto, imagen, video, etc.) |
|--|---|
| 1. Desarrollo y validación de un modelo matemático para la capacidad de absorción de materia orgánica de la macrófita <i>Eichhornia crassipes</i> en el sector el espino- Río Bogotá Planta de Tratamiento de Agua Potable Tibitoc.pdf | Texto digital |

En constancia de lo anterior, Firmo (amos) el presente documento:

| APELLIDOS Y NOMBRES COMPLETOS | FIRMA (autógrafa) |
|--------------------------------------|------------------------------|
| LARA MENDIVELSO JULIE ANDREA | Julie Andrea Lara Mendivelso |
| SUÁREZ MALAGÓN ANDRÉS JOSÉ | Andrés José Suárez Malagón |
| | |
| | |

21.1-51.20.

Calle 14 Avenida 15 Barrio Berlín Facatativá - Cundinamarca
 Teléfono (091) 8920707-8920709-8920706 Línea Gratuita 018000180414
 www.ucundinamarca.edu.co E-mail: info@ucundinamarca.edu.co
 NIT: 890 680 062-2

Documento controlado por el Sistema de Gestión de la Calidad
 Asegúrese que corresponde a la última versión consultando el Portal Institucional

DESARROLLO Y VALIDACIÓN DE UN MODELO MATEMÁTICO PARA LA
CAPACIDAD DE ABSORCIÓN DE MATERIA ORGÁNICA DE LA MACRÓFITA
EICHHORNIA CRASSIPES EN EL SECTOR EL ESPINO- RÍO BOGOTÁ PLANTA
DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE TIBITOC.

JULIE ANDREA LARA MENDIVELSO
ANDRÉS JOSÉ SUÁREZ MALAGÓN

UNIVERSIDAD DE CUNDINAMARCA
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL
FACATATIVÁ
2019

DESARROLLO Y VALIDACIÓN DE UN MODELO MATEMÁTICO PARA LA
CAPACIDAD DE ABSORCIÓN DE MATERIA ORGÁNICA DE LA MACRÓFITA
EICHHORNIA CRASSIPES EN EL SECTOR EL ESPINO- RÍO BOGOTÁ PLANTA
DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE TIBITOC.

JULIE ANDREA LARA MENDIVELSO
ANDRÉS JOSÉ SUÁREZ MALAGÓN

Trabajo de Grado presentado como requisito para optar al título profesional de
Ingeniero Ambiental

Directora: MSC. Luz Jaddy Castañeda Rodríguez
Codirectora: MSC. Paula Andrea Casas Cortés

UNIVERSIDAD DE CUNDINAMARCA
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL
FACATATIVÁ
2019

Nota de aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma de jurado

Facatativá, 15 de marzo de 2019.

Este trabajo lo dedicamos a nuestros padres, ya que por medio de su amor, dedicación y esfuerzo, siempre han brindado lo mejor para forjarnos un exitoso futuro.

Al ser pilares de inspiración y motivación en cada acción que emprendemos, por su incondicional apoyo y en especial, por creer en nosotros.

Todo esto ha sido posible gracias a ellos.

AGRADECIMIENTOS

Han sido muchas personas quienes se han involucrado directa o indirectamente en desarrollo de este proyecto, y cuyo propósito ha sido el éxito del mismo, es a ellos quienes expresamos nuestra incondicional gratitud, destacándose principalmente:

Nuestras tutoras Luz Jaddy Castañeda Rodríguez y Paula Andrea Casas Cortés, quienes desde sus diferentes campos de especialización han brindado acompañamiento y apoyo técnico.

La coordinadora de laboratorios de la Universidad de Cundinamarca extensión Facatativá Sandra Devia, quien amablemente nos colabora y permite hacer uso de estos espacios.

El coordinador del programa de ingeniería ambiental y demás administrativos de la Universidad de Cundinamarca que permitieron mediante el préstamo de espacios y recursos físicos, el desarrollo de la metodología propuesta.

Y de manera especial a nuestros padres y familiares, por su incondicional apoyo motivacional, económico y de tiempo durante la ejecución de este proyecto.

Muchas gracias.

CONTENIDO

| | |
|--|------|
| Introducción | 188 |
| 1. Definición del problema | 2020 |
| 1.1 Formulación del problema | 2222 |
| 1.2 Delimitación | 2323 |
| 1.2.1 Área de estudio: | 233 |
| 1.2.2 Delimitación temporal: | 244 |
| 2. Justificación | 255 |
| 3. Objetivos..... | 277 |
| 3.1 OBJETIVO GENERAL | 277 |
| 3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 277 |
| 4. Marco referencial | 288 |
| 4.1 Marco teórico..... | 288 |
| 4.2 Marco legal..... | 299 |
| 4.3 Marco conceptual | 30 |
| 4.4 Fundamentos teóricos de <i>Eichhornia crassipes</i> | 3333 |
| 4.4.1 Morfología..... | 3333 |
| 4.4.2 Reproducción..... | 354 |
| 4.4.3 Habitat | 355 |
| 5. Diseño metodológico | 388 |
| 5.1 Diseño experimental..... | 399 |
| 5.2 Metodología | 399 |
| 5.2.1 Delimitación espacial | 399 |
| 5.2.2 Unidades de monitoreo:..... | 4040 |
| 5.2.3 Variables..... | 4545 |
| a) <i>Ganancia de Biomasa</i> | 455 |
| b) <i>Densidad Poblacional</i> | 47 |
| c) <i>Materia Organica Absrovida</i> | 489 |
| 5.2.4 Modelo Logaritmico de Malthus y Logístico de Verhulst..... | 5151 |
| 5.3 Reconocimiento zona experimental | 53 |
| 5.4 Recolección de especímenes..... | 555 |
| 6. Resultados y discusión | 577 |

| | |
|--|------|
| 6.1 Biomasa | 577 |
| 6.2 Densidad | 655 |
| 6.3 Materia orgánica absorbida | 7070 |
| 6.3.1 Demanda Biológica de Oxígeno (DBO ₅): | 7070 |
| 6.3.2 Demanda Química De Oxígeno (DQO): | 733 |
| 6.4 Validación de los modelos logarítmico de Malthus y logístico de Verhulst. | 75 |
| 5 | |
| 6.5 Relación ganancia de biomasa vs materia orgánica absorbida..... | 8282 |
| 7. CONCLUSIONES | 8585 |
| 8. RECOMENDACIONES..... | 867 |
| 9. Trabajos citados..... | 888 |

LISTA DE GRÁFICAS

| | |
|--|---|
| Gráfica 1. Ganancia de Biomasa de <i>Eichhornia crassipes</i> para el grupo de control durante los siete períodos de monitoreo entre el 25 de abril al 27 de julio del 2018. | 588 |
| Gráfica 2. Ganancia de Biomasa de <i>Eichhornia crassipes</i> para el grupo experimental durante los siete períodos de monitoreo entre el 25 de abril al 27 de julio del 2018..... | 61 |
| Gráfica 3. Estimación Densidad Relativa (DR) en el grupo de control entre el 25 de abril al 27 de julio del 2018. | 66 |
| Gráfica 4. Estimación de Densidad poblacional y Densidad Relativa (DR) en el grupo experimental entre el 25 de abril al 27 de julio del 2018..... | 67 |
| Gráfica 5. Estimación de la Densidad poblacional del Buchón de Agua los grupos de control y experimental, entre el 25 de abril al 27 de julio del 2018..... | 68 |
| Gráfica 6. Curva DBO ₅ y DQO, a partir de los resultados de análisis de laboratorio entre abril-agosto 2018 | 711 |
| Gráfica 7. Modelo logarítmico para los grupos control y experimental durante los siete períodos de monitoreo del experimento, comprendido entre el 25 de abril al 27 de julio del 2018..... | 766 |
| Gráfica 8. Representación del modelo logístico para los grupos de control y experimental, durante los siete períodos de monitoreo del experimento, comprendido entre el 25 de abril al 27 de julio del 2018..... | 7979 |
| Gráfica 9. Crecimiento logístico de los grupos de control y experimental, entre el 25 de abril al 27 de julio del 2018 | ¡Error! Marcador no definido. 80 |
| Gráfica 10. Resistencia de los grupos de control y experimental durante los siete períodos de monitoreo del experimento, comprendido entre el 25 de abril al 27 de julio del 2018..... | 8181 |
| Gráfica 11. Valores promedio de las variables biomasa, DQO y DBO ₅ para el grupo experimental. | 822 |
| Gráfica 12. Valores promedio de las variables densidad, DQO y DBO ₅ para el grupo experimental..... | 83 |

LISTA DE TABLAS

| | |
|--|------|
| Tabla 1. Valores estimados de biomasa, parámetros de promedio y desviación estándar para los días 0 y 16, correspondiente al grupo de control de <i>Eichhornia crassipes</i> durante el 25 de abril al 27 de julio del 2018. | 588 |
| Tabla 2. Valores estimados de biomasa, parámetros de promedio y desviación estándar para los días 16, 31, 48, 61 y 77 correspondiente al grupo de control de <i>Eichhornia crassipes</i> durante el 25 de abril al 27 de julio del 2018..... | 5959 |
| Tabla 3. Valores estimados de biomasa, parámetros de promedio y desviación estándar para los días 77 y 92 correspondiente al grupo de control de <i>Eichhornia crassipes</i> durante el 25 de abril al 27 de julio del 2018. | 600 |
| Tabla 4. Valores estimados de biomasa, parámetros de promedio y desviación estándar para los días 0 y 16 correspondiente al grupo experimental de <i>Eichhornia crassipes</i> durante el 25 de abril al 27 de julio del 2018. | 611 |
| Tabla 5. Valores estimados de biomasa, parámetros de promedio y desviación estándar para los días 16 y 31 correspondiente al grupo experimental de <i>Eichhornia crassipes</i> durante el 25 de abril al 27 de julio del 2018..... | 622 |
| Tabla 6. Valores estimados de biomasa, parámetros de promedio y desviación estándar para los días 31, 48, 61, 77 y 92 correspondiente al grupo experimental de <i>Eichhornia crassipes</i> durante el 25 de abril al 27 de julio del 2018..... | 633 |
| Tabla 7. Biomasa seca de <i>Eichhornia crassipes</i> en los días 31 y 77 para el grupo de control, entre el 25 de abril al 27 de julio del 2018..... | 644 |
| Tabla 8. Ganancia de Biomasa seca de <i>Eichhornia crassipes</i> durante los intervalos 16 y 31 del grupo experimental, entre el 25 de abril al 27 de julio del 2018. | 644 |
| Tabla 9. Capacidad de carga (K) para los grupos de control y experimental, durante el 25 de abril al 27 de julio del 2018. | 6969 |
| Tabla 10. Promedio resultados obtenidos cálculo de variables en reactores, durante el 25 de abril al 27 de julio del 2018. | 700 |
| Tabla 11. Parejas de datos de densidad y biomasa para la determinación de la capacidad de carga y la constante de crecimiento relativo..... | 788 |

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Tasa promedio de remoción de materia orgánica para el Buchón de Agua para los días 31, 61 y 92 | 84 |
|---|----|

LISTA DE ILUSTRACIONES

| | |
|--|------|
| Ilustración 1. Morfología de individuo adulto de <i>Eichhornia crassipes</i> | 333 |
| Ilustración 2. Ciclo de vida y propagación sexual y asexual de <i>Eichhornia crassipes</i> propuesto por Olvera en 1989 | 35 |
| Ilustración 3. Hipótesis de distribución para <i>Eichhornia crassipes</i> en Colombia.. | 366 |
| Ilustración 4. Zona de recolección ronda Río Bogotá, en el sector El Espino-Tocancipá Cundinamarca, durante el 22 de abril al 22 de agosto de 2018. | 388 |
| Ilustración 5. Ubicación grupos control y experimental en el presio Marsella, Río Bogotá - sector El Espino, durante el 22 de abril al 22 de agosto de 2018..... | 4040 |
| Ilustración 6. Construcción de corrales (fotografía costado izquierdo) y plano de diseño por cuadrante (figura costado derecho) de la unidad de control..... | 411 |
| Ilustración 7. Instalación de los reactores de desarrollo poblacional (fotografía costado izquierdo) y plano de tanque rectangular (figura costado derecho) de la unidad experimental..... | 43 |
| Ilustración 8. Cauce Río Bogotá de sur a norte, en la Bocatoma Norte de la Planta de Tratamiento Tibitoc para el 04 de abril de 2018..... | 5454 |
| Ilustración 9. Población de <i>Eichhornia crassipes</i> en la zona de monitoreo <i>in situ</i> para el 15 de mayo (fotografía costado izquierdo) y el 01 de agosto (fotografía costado derecho) del 2018. | 55 |
| Ilustración 10. Recolección de muestras en unidades control | 566 |
| Ilustración 11. Evidencia necrosis en estructuras asociadas al Buchón de Agua, en unidad experimental y control respectivamente..... | 722 |

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1. Ubicación geográfica.

Anexo 1.1. Ubicación de la zona de recolección de datos PTAP Tibitoc y Río Bogotá, en el sector el espino-Tocancipá Cundinamarca, durante el 22 de abril al 22 de agosto de 2018.

Anexo 1.2. Ubicación espacial de grupos control (*in situ*) y experimental (condiciones aisladas) en el Río Bogotá, sector El Espino municipio Tocancipá, durante el 22 de abril al 22 de agosto de 2018.

Anexo 2. Tabla de recolección de datos crudos obtenidos en el grupo de control, entre el 25 de abril al 27 de julio del 2018.

Anexo 3. Tabla de recolección de datos crudos obtenidos en el grupo experimental, entre el 25 de abril al 27 de julio del 2018.

Anexo 4. Estimación biomasa seca y parámetros estadísticos de *Eichhornia crassipes* el grupo de control (*in situ*), entre el 25 de abril al 27 de julio del 2018.

Anexo 5. Estimación biomasa seca y parámetros estadísticos de *Eichhornia crassipes* en la unidad experimental (confinada), entre el 25 de abril al 27 de julio del 2018.

Anexo 6. Cálculo de densidad poblacional y parámetros estadísticos de *Eichhornia crassipes* en la unidad de control (*in situ*), entre el 25 de abril al 27 de julio del 2018.

Anexo 7. Cálculo de densidad poblacional y parámetros estadísticos de *Eichhornia crassipes* en el grupo experimental (Confinado), entre el 25 de abril al 27 de julio del 2018.

Anexo 8. Cálculo coeficiente de correlación de estimado de área foliar y flotante en el grupo de control (*in situ*), entre el 25 de abril al 27 de julio del 2018.

Anexo 9. Cálculo coeficiente de correlación de estimado de área foliar y flotante en el grupo experimental (confinado), entre el 25 de abril al 27 de julio del 2018.

Anexo 10. Estimación de la Capacidad de Carga (K), Constante de razón de desarrollo (C) y tasa de crecimiento específico (r) del grupo de control, durante el 25 de abril al 27 de julio del 2018.

Anexo 11. Estimación de la Capacidad de Carga (K), Constante de razón de desarrollo (C) y tasa de crecimiento específico (r) del grupo experimental, durante el 25 de abril al 27 de julio del 2018.

Anexo 12. Validación matemática del modelo logarítmico de Malthus y logístico de Verhulst del grupo de control, durante el 25 de abril al 27 de julio del 2018.

Anexo 13. Validación matemática del modelo logarítmico de Malthus y logístico de Verhulst del grupo experimental, durante el 25 de abril al 27 de julio del 2018.

Anexo 14. Cálculo de densidad poblacional y parámetros estadísticos de la *Eichhornia crassipes* en el grupo de control (in situ) con peso húmedo, entre el 25 de abril al 27 de julio del 2018.

Anexo 15. Cálculo de biomasa y parámetros estadísticos de la *Eichhornia crassipes* en el grupo de control (in situ) con peso húmedo, entre el 25 de abril al 27 de julio del 2018.

Anexo 16. Estimación de la Capacidad de Carga (K), Constante de razón de desarrollo (C) y tasa de crecimiento específico (r) del grupo de control con el peso húmedo, durante el 25 de abril al 27 de julio del 2018.

Anexo 17. Validación matemática del modelo logarítmico de Malthus y logístico de Verhulst del grupo de control con peso húmedo, durante el 25 de abril al 27 de julio del 2018.

Anexo 18. Recopilación de información de campo, (mediciones alométricas, estimación de área foliar y flotante de peciolo), de los grupos de control y experimental durante el 25 de abril al 27 de julio del 2018.

Anexo 19. Comportamiento del caudal del Río Bogotá reportado por la estación CAR "El Espino", Código 2120793, para los meses de junio y julio de 2018.

Anexo 20. Resultados muestreo DBO5 y DQO, Laboratorio CIAN Ltda.

GLOSARIO

ABSORCIÓN: Capacidad de incorporar materias o sustancias externas por parte de un tejido orgánico o una célula. (RAE, 2018)

ÁREA FOLIAR (AF): Representa la lámina foliar proyectada (Salgado & Paz, 2015).

BIOMASA: La materia total de seres vivos que habitan en un ecosistema definido, expresada como peso por unidad de área o volumen. (RAE, 2018)

CAPACIDAD DE ASIMILACIÓN Y DILUCIÓN: Es la aptitud de un cuerpo de agua para receptor y degradar, en este caso, sustancias o elementos mediante procesos naturales, físicos, químicos o biológicos. (Minambiente, 2010)

CAUCES MEÁNDRICOS: Se presentan en terrenos de pendientes bajas y materiales finos en el fondo del lecho, su forma radica en la divagación de curvas repetidas de dirección contraria dentro del ancho general del valle del río. Presentan un flujo curvilíneo con áreas de erosión y depósito. (Reyes, Ulises & Carvajal, 2010)

CAUCE NATURAL: Faja de terreno que toma las aguas de una corriente al alcanzar sus niveles máximos por efecto de las crecientes ordinarias. (Minambiente, 2010)

CRECIMIENTO: Incremento irreversible en las dimensiones de la planta, el cual constituye la ganancia de biomasa. (Di Benedetto & Tognetti, 2016)

DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO (DBO): Medida que define la cantidad de oxígeno empleado por los microorganismos para la biodegradación de materia orgánica en condiciones aeróbicas, en condiciones de referencia de 20°C durante cinco días como mínimo. (IDEAM, 2007)

DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO): Parámetro que permite determinar la cantidad de oxígeno requerido en la oxidación de materia orgánica en una muestra de agua, siempre en condiciones específicas de agente oxidante, temperatura y tiempo. (IDEAM, 2007)

DENSIDAD RELATIVA O ECOLÓGICA: “es el número de organismos de una especie por unidad de espacio específico, es decir, se consideran únicamente las zonas que comprenden su hábitat”. (Kohli, Batish & Singh, 2014)

DISEÑO EXPERIMENTAL VERDADERO: Es un método preciso en la investigación experimental en el cual se trata de comprobar o refutar una hipótesis de forma matemática y con análisis estadístico. (Shuttleworth, 2008)

ESTOLÓN: Plantas con brotes laterales delgados del tallo, generalmente muy largos y que en las macrófitas puede dispersarse a través o bajo los primeros centímetros de la superficie del espejo de agua. (Salgado & Paz, 2015)

LIMNOCORRAL: Estructura flotante de material liviano que permite el confinamiento, para este caso, de organismos vegetales en un área definida. (Rodríguez, 2004)

MACRÓFITA: Aquellas plantas herbáceas, capaces de crecer y desarrollarse en suelos saturados o cubiertos por agua, debido a que su sistema radicular está habituado para permanecer y tolerar un largo período en contacto con el agua. (Valderrama, Rivera & Gómez, 2016)

MATERIA ORGÁNICA: Se determina así a la carga de compuestos orgánicos e inorgánicos que en su degradación química o biológica demandan el oxígeno disuelto en el agua. (Londoño, Giraldo & Gutiérrez, 2010)

MODELO MATEMÁTICO: Es un arreglo matemático empleado para simplificar las múltiples variables de un fenómeno y así representarlo y definir una tendencia en el futuro. (Castro, 2013)

PECIOLO: Estructura vegetal que une el limbo con el tallo. (Alonso, 2011)

PESO FRESCO O HÚMEDO: Es el peso del material vivo que se encuentra en un área y un momento. (Morello & Oliver, 1981)

PESO SECO: Es el peso del material restante, tras extraer toda el agua que lo compone. (Standard Methods, 2005)

PRODUCTIVIDAD: Describe la Biomasa por unidad de tiempo ($\text{Kg/m}^2/\text{día}$) (Russo, 1983)

PROPAGACIÓN VEGETATIVA: Mecanismo de reproducción vegetal, que sustituye la propagación sexual en algunas especies vegetales, por medio de bulbos, estolones, tubérculos, etc. (Alonso, 2011)

REACTOR VEGETAL / CÁMARA DE DESARROLLO VEGETAL: Estructura de material impermeable que permite el desarrollo vegetal aislado para observar la evolución de la especie bajo determinados parámetros. (Rodríguez, 2004)

RIBERA: Parte de tierra adyacente a un cuerpo de agua, generalmente considerada como la orilla del mismo. (IGAC, 2015)

RÍO: Curso de agua permanente e importante, formado por la descarga de otros cursos de agua o afluentes, el cual vierte sus aguas en otro río, lago o en el mar. (IGAC, 2015)

SISTEMA CONFINADO: Para este estudio es la unidad experimental aislada del aporte continuo de nutrientes vinculados por la acción de arrastre del cauce, y del cual se nutren las macrófitas. (Rodríguez, 2004)

TASA DE CRECIMIENTO ESPECÍFICO: Relación existente entre la generación de biomasa expresada en unidades de peso por peso por tiempo, ya sea en peso seco o húmedo, o número de plantas, así como los tiempos de duplicación. (Olvera Vlascán, 1989)

UNIDAD EXPERIMENTAL O DE MONITOREO: Es el ambiente establecido para un objeto en el que se mide una variable. (García & Hernández, 2014)

RESUMEN

La Planta de Tratamiento de Agua Potable- PTAP Tibitoc se abastece en gran medida por el Río Bogotá a través de dos bocatomas ubicadas en el sector el Espino. Allí es evidente el desarrollo incontrolado de la macrófita *Eichhornia crassipes* atribuido al constante aporte de carga de nutrientes y materia orgánica aguas arriba de la cuenca, lo cual genera problemas en la dinámica ecosistémica del cuerpo de agua, así como en la calidad del recurso que abastece a la planta. En este estudio, se evalúa la capacidad de absorción de materia orgánica de la especie, mediante el desarrollo y la validación del modelo matemático de Malthus y del modelo logístico de Verhulst, a partir de la evaluación de la biomasa, densidad, DBO₅ y DQO las cuales presentan un mismo comportamiento favoreciendo el análisis de los resultados y permitiendo estimar que la remoción de la población de la especie *Eichhornia crassipes* debe efectuarse a partir del día 77 para que sea efectivo el proceso de remoción de materia orgánica y con esto disminuir la cantidad de material que ingresa a la dársena de pre sedimentación, siempre y cuando esta actividad no supere el día 165 considerado este como el periodo en el cual la población del Buchón de Agua colmata el sistema generando consigo impactos negativos al recurso hídrico.

PALABRAS CLAVE

Absorción de materia orgánica, Buchón de Agua, *Eichhornia crassipes*, macrófita, modelo matemático.

ABSTRACT

The Potable Water Treatment Plant- PTAP Tibitoc is largely supplied by the Río Bogotá through two intakes located in the sector El Espino. There is evident the uncontrolled development of the macrophyte *Eichhornia crassipes* attributed to the constant contribution of nutrients and organic matter load upstream of the basin, which generates problems in the ecosystem dynamics of the body of water, as well as in the quality of the resource that supplies to the plant. In this study, the absorption capacity of organic matter of the species is evaluated through the development and validation of the mathematical model of Malthus and the Verhulst logistic model, based on the evaluation of biomass, density, BOD5 and COD. which present the same behavior favoring the analysis of the results and allowing to estimate that the removal of the population of the species *Eichhornia crassipes* should be carried out from day 77 so that the process of removal of organic matter is effective and with this decrease the amount of material that enters the pre-sedimentation basin, as long as this activity does not exceed the 165th day considered as the period in which the population of the Water Hyacinth clogs the system, generating negative impacts on the water resource.

KEYWORDS

Absorption organic matter, Water Hyacinth, *Eichhornia crassipes*, macrophyte, mathematical model.

INTRODUCCIÓN

El uso de macrófitas como agentes biorremediadores dentro del tratamiento de aguas residuales (Porrás, 2017) se ha destacado por la eficiencia de remoción de nutrientes disueltos, sustancias orgánicas e incluso metales pesados, en virtud de la adaptabilidad, asimilación y resistencia de este tipo de vegetación en sistemas acuáticos con altas cargas de este tipo de sustancias, que en la mayoría de casos, son aportadas por la escorrentía o vertimiento de aguas residuales de procedencia antrópica (Bolaños, Casas, & Aguirre, 2008).

Generalmente estas iniciativas biotecnológicas son desarrolladas en humedales artificiales, laboratorios o en sistemas de tratamiento de aguas residuales (Porrás, 2017), haciendo necesario identificar si la eficiencia de remoción es favorable cuando las macrófitas se encuentran implícitas en la naturaleza (Castañeda, 2012), y pueden apoyar en la capacidad de asimilación y dilución de elementos descargados en los cuerpos de agua en los que habitan

Al identificar este tipo de facultades, se puede hacer uso de la capacidad de resistencia y adaptabilidad de la especie, aprovechándola como mecanismo de absorción de sustancias que perjudican el recurso y contemplando a su vez (Forero & Guayacundo, 2011), la necesidad de establecer un mecanismo de control poblacional mediante su remoción después de cierto tiempo de madurez, a fin de evitar una probable invasión del sistema hídrico (Martelo & Lara, 2012).

Un claro ejemplo de desaprovechamiento del empleo de estas especies, ocurre en el Río Bogotá en el sector El Espino del municipio de Tocancipá, entre el tramo de la bocatoma norte hasta los 1500 m aguas arriba de la bocatoma sur de la planta de tratamiento de agua potable PTAP Tibitoc agregado norte (EAB, 2015), donde es evidente la abundancia de la *Eichhornia crassipes* (Rodríguez, 2004), atribuido al constante aporte de carga de nutrientes y materia orgánica aguas arriba de la cuenca (Camacho, 2012) además de la influencia de la escorrentía y vertimientos puntuales de carácter doméstico, agropecuario e industrial de varios municipios (Figueredo & Castiblanco, 2011), acciones que intensifican la colonización de este tipo de vegetación sobre el espejo de agua (EAB, 2015), y la contribución de las mismas al deterioro de la infraestructura de captación de la planta (Bacca & Morales, 2007; Bohórquez, 2009; Rodríguez, Gómez, Garavito, & López, 2010), siendo este el motivo por el cual la Empresa de Acueducto de Bogotá y la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca-CAR realizan actividades de remoción de la mayoría de especies en algunos sectores de la zona.

Sin embargo, estas medidas de control no son las más eficientes, puesto que su remoción o conservación en aquellos sectores no está sujeto al tiempo de permanencia propicio y en especial a la facultad de acumulación de materia

orgánica, lo que ocasiona la liberación de aquellos nutrientes capturados cuando las plantas se encuentran en un estado de maduración y/o marchitamiento (Feo, 2013), repercutiendo directamente en los procesos de pre tratamiento por parte de la PTAP- Tibitoc que aumentan los costos asociados al tratamiento del agua por la presencia de sedimentos de origen macrófito (Paredes, 2004).

Es por esto, que el objetivo de esta investigación es estimar mediante el desarrollo y validación de un modelo matemático que de manera específica evalúe la capacidad de absorción de materia orgánica de la macrófita *Eichhornia crassipes* en el tramo del río Bogotá, en el cual se desarrolla la presente investigación. A partir de lo anterior identificar el tiempo propicio para la remoción de esta especie en la zona de abastecimiento de agua potable por parte de las entidades a cargo, tales como la Empresa de Acueducto de Bogotá actual administradora y encargada de la operación de la Planta de Tratamiento de Agua Potable- PTAP Tibitoc y la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca-CAR.

1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Teniendo en cuenta los contextos abordados por cada uno de los dos modelos que se contemplan en el presente trabajo de investigación (Modelo de Malthus y modelo de Verhulst), es pertinente traer a colación los estudios adelantados y que involucran el área objeto de estudio, cronológicamente, en el año 2004, la Universidad de los Andes propone dos tesis de grado orientadas al uso de macrófitas, entre ellas la *Eichhornia crassipes* y su efecto sobre la calidad del agua que abastece a la Planta de Tratamiento de Agua Potable Tibitoc, planta de tratamiento a la cual está asociada la presente investigación.

El primer estudio en relación denominado “Utilización de macrófitas para la remoción de nutrientes y metales en aguas destinadas al consumo humano- Caso Planta de Tratamiento de Tibitoc” permite relacionar una de las variables de estudio del presente trabajo de grado, haciendo referencia a la tasa de crecimiento de la especie *Eichhornia crassipes* como insumo para aplicar un modelo logístico que permita evidenciar la curva de crecimiento propia de la especie; para este caso se llevó a cabo la evaluación en la dársena de pre sedimentación de la PTAP Tibitoc. Los modelos matemáticos a los que se hace referencia corresponden al modelo logarítmico de Malthus y el modelo logístico de Verhulst, los dos modelos serán desarrollados en la presente investigación.

El segundo estudio corresponde a la “Modelación matemática y evaluación del efecto del uso de macrófitas sobre la calidad del agua en la dársena de Tibitoc” la cual constituye la primera aproximación de la aplicación de un modelo matemático, con el fin de evaluar la capacidad de remoción manganeso y nutrientes presentes en la dársena por parte de *Eichhornia crassipes*, lo anterior mediante la siembra de macrófitas (Vanegas, 2004). Cabe destacar que el modelo empleado corresponde a un modelo hidrodinámico, producto de la investigación de la Universidad de los Andes y adaptación del modelo desarrollado en 1991 por Hugo Fisher y bajo las teorías matemáticas estipuladas por Lendertsee en el año de 1967.

En el año 2009 la Universidad Nacional de Colombia en conjunto con la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá proponen la modelación dinámica de la calidad del agua del río Bogotá, teniendo en cuenta toda su cuenca (alta, media y baja), dicha modelación buscó tener una aproximación de la capacidad de asimilación de la carga contaminante del río, teniendo a su vez un diagnóstico de las condiciones del cuerpo lotico en ese periodo evaluado y de su comportamiento a futuro. Al tratarse de un modelo dinámico de calidad de agua es necesario contar con información respecto a determinantes claves en puntos estratégicos del río, lo anterior con el fin de alimentar el modelo QUAL2K propuesto para alcanzar los objetivos planteados (Universidad Nacional de Colombia, 2009).

El estudio más reciente se registra en el año 2013, cuyo nombre corresponde a la “Modelación de la calidad del Agua del Río Bogotá en la Cueca Alta incorporando Incertidumbre- Tramo Villapinzón- Tibitoc”, la investigación desarrollada tomo como parte del insumo para la validación del modelo los resultados obtenidos del modelo ya propuesto y anteriormente señalado de la Universidad Nacional, junto con la empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá. La metodología descrita en dicho estudio menciona el uso de varios bloques de MATLAB y para evaluar el transporte de solutos se reporta el uso del modelo MDLC- ADZ o HEC-RAS (Rodríguez, 2013).

Eichhornia crassipes es una especie vegetal acuática flotante, conocida comúnmente como Buchón o Jacinto de agua, Lechuguilla, Taruya, Oreja de mula etc. (CEIBA, 2015), oriunda de Suramérica, y actualmente distribuida considerablemente en las regiones tropicales y subtropicales del mundo (Funk *et al*, 2007), donde se ha convertido en un problema ambiental, principalmente porque obstruye los canales de drenaje y cubre completamente el espejo de agua de embalses, lagunas y humedales, provocando cambios en sus ciclos de nutrientes, en su oxigenación y en su composición de microorganismos. Sumado a esto, es una especie con capacidad de adaptarse en entornos alterados con aguas contaminadas y poco dinámicas, lo cual la convierte en una de las especies invasoras más peligrosas alrededor del mundo (CEIBA, 2015).

A la fecha, existen diversos estudios e investigaciones desarrollados en cercanías a la zona objeto de estudio, centrados en la utilidad del Buchón de Agua como bioacumulador de metales pesados bajo condiciones controladas (Castañeda, 2012), depurador de diferentes cargas de agentes nitrogenados o fosfatados por medio de microorganismos asociados a sus raíces (Saldarriaga, Garrido, Hoyos, & Correa, 2009), fitorremediador para la reducción del impacto de los vertimientos sobre el Río Bogotá, de las aguas residuales generadas en el campus universitario de la Universidad Militar Nueva Granada sede Cajicá (Forero & Guayacondo, 2011), sobre sus efectos hidráulicos dentro de un canal abierto (Bacca & Morales, 2007; Bohórquez, 2009; Rodríguez, Gómez, Garavito & López, 2010), y la evaluación de su capacidad de deterioro del canal hidráulico del río (Bacca & Morales, 2007) identificándose tan solo un estudio donde se emplea esta especie acuática a modo experimental en la dársena de la PTAR Tibitoc cuya finalidad se dirige a remover nutrientes y metales del agua destinada para el consumo humano (Rodríguez, 2003).

Del mismo modo, existen diversos artículos, centrados en estudiar el potencial invasivo (Cárdenas, Baptiste & Castaño, 2017) y la privación de servicios ecosistémicos de esta especie sobre los diferentes cuerpos de agua que se encuentran en la sabana de Bogotá (Rial, 2013; Camelo, Martínez, Ovalle & Jaimes, 2016).

1.1 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

A escala mundial, la macrófita *Eichhornia crassipes*, conocida comúnmente como Buchón, Jacinto o Jazmín de agua, es una de las especies más estudiadas en el concepto de agente biorremediador de aguas contaminadas, debido a su efectividad en la remoción de organismos patógenos, metales pesados y materia orgánica en condiciones controladas (Valderrama, 1996). El buchón ha sido materia de investigación en varios países, abordando las ventajas y desventajas de su permanencia prolongada en un cuerpo de agua, lo anterior considerando la facilidad que presenta para reproducirse en sistemas con bajo flujo, hecho que motiva la proliferación excesiva de la especie y con ello una serie de repercusiones negativas al cuerpo de agua en el que se encuentra presente (Bacca & Morales, 2007). Siendo la evaluación de su capacidad de remoción de materia orgánica el fundamento de la presente investigación.

En Colombia se ha motivado el uso del buchón de agua (*Eichhornia crassipes*) para el tratamiento de aguas residuales, sin embargo, algunos estudios plantean el control que se debe ejercer a la proliferación de esta especie, debido a su facultad de dispersión ante una oferta de nutrientes en particular de fósforo (P) y nitrógeno (N). De este modo, es importante contemplar las medidas que han tenido que adoptar varios proyectos de generación de energía eléctrica y abastecimiento de agua potable, en cuanto se refiere al control de la cosecha del Buchón de Agua. Medidas que se han tomado con miras a aprovechar esta macrófita de manera eficiente y benéfica, una vez su proliferación ha traído repercusiones económicas y ecológicas (Cárdenas, Aguilar, Sánchez, Herrera & Aguirre, 2012). Otro de los estudios adelantados y específicamente tratando canales abiertos, expone los efectos hidráulicos que puede ocasionar la macrófita *Eichhornia crassipes*, al no manejar adecuadamente su crecimiento, presentando características que en su momento pueden afectar la calidad del agua (Bacca & Morales, 2007).

Ahora bien, la presencia de materia orgánica aportada por las descargas de aguas residuales en el Río Bogotá, ya sea de origen industrial, agropecuario (EAB, 2015) y doméstico aportado por municipios como Villapinzón y Tocancipá (Gobernación de Cundinamarca, 2017), e industrias que aún no cuentan con un sistema de tratamiento de aguas residuales, limita la calidad del recurso hídrico como fuente de abastecimiento de la Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP) Tibitoc, por causa en el incremento de los costos asociados al proceso de pre tratamiento relacionados con la adecuación del canal hidráulico (Bacca & Morales, 2007; Bohórquez, 2009; Rodríguez, Gómez, Garavito & López, 2010) y mantenimiento de la infraestructura de la dársena.

Dicha sobreoferta de nutrientes dada la presencia de materia orgánica, ha favorecido el desarrollo en mayor medida de poblaciones contiguas y no contiguas de la macrófita *Eichhornia crassipes* (Rodríguez, 2004) específicamente en el sector El Espino donde se encuentra la PTAP Tibitoc, entre la bocatoma norte y aguas arriba del punto de instalación de la fase experimental de esta investigación, cuya presencia se puede emplear como agente reductor de la carga de materia orgánica que ingresa al sistema, aprovechando que su capacidad de acumulación de biomasa y con esto densidad poblacional es acelerada, ya que en menos de un año alcanza a cubrir un rango del 98 a 100% del espejo de agua (Rodríguez, 2004). Es por esto que se debe identificar el punto máximo de absorción de materia orgánica por parte del Buchón de Agua y relacionarla en términos de la acumulación de biomasa bajo el desarrollo y validación del modelo logarítmico de Malthus y el modelo logístico de Verhulst.

De esta manera se permite identificar el comportamiento de la absorción de materia orgánica por parte de la especie, e identificar el punto máximo de acumulación para realizar su retiro y evitar la liberación paulatina de los elementos removidos inicialmente, retornándolos al cuerpo de agua como solutos y/o sedimentos, acarreando consigo "...tanto efectos químicos notorios sobre la calidad del agua y físicos sobre la biología del cuerpo de agua" (Rodríguez, 2004, páginas 9-10) lo que hace necesario su recolección de forma periódica.

Por esto se hace necesario relacionar mediante el modelo logarítmico de Malthus y el modelo logístico de Verhulst el comportamiento en el crecimiento Buchón de Agua asociando la capacidad de absorción de materia orgánica respecto a la producción de biomasa para dar respuesta al siguiente interrogante: ¿Cual es tiempo favorable de permanencia en el cuerpo de agua de la población de *Eichhornia crassipes* en función de su capacidad de absorción de materia orgánica?

1.2 DELIMITACIÓN

1.2.1 Área de estudio: la investigación se desarrolla mediante la instalación de dos unidades experimentales, constituidas por un grupo control (*in situ*), que integra cuatro (4) limnocorrales identificados de la letra A a la D, e instalados y distribuidos a lo largo de dieciocho (18) metros de la ribera occidental del Río Bogotá, colindante con el predio Marsella (CAR, 2018), y un grupo experimental, asociado con un sistema aislado y que corresponde a tres (3) cámaras o reactores de desarrollo vegetal, numerados del 1 al 3 y ubicados dentro del predio anteriormente nombrado, con una cercanía a la zona de monitoreo *in situ* de cuatro (4) metros.

1.2.2 Delimitación temporal: contemplando las fases de montaje y remoción de estructuras (entiéndase como estructura los limnocorrales y reactores de desarrollo vegetal), la práctica considera aproximadamente cinco (5) meses, iniciando el 20 de abril y finalizando el 20 de agosto del año 2018.

2. JUSTIFICACIÓN

Se ha identificado que el uso de *Eichhornia crassipes* en la remoción de la carga de materia orgánica se relaciona directamente con la disminución de la turbidez a consecuencia del denso sistema radicular característico de la especie, lo que facilita la adsorción y sedimentación hasta del 70% de elementos que afectan este parámetro. Sin embargo, la eficiencia de la planta se optimiza una vez se realice el retiro periódico de las poblaciones de acuerdo a su capacidad de absorción. Para el caso, esta eficiencia en la absorción de materia orgánica por parte del Buchón de Agua, incide en los valores de turbidez que pueden ingresar a la dársena de pre sedimentación de la planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP) Tibitoc, debido a que en al no presentarse un adecuado manejo de las poblaciones de esta macrófita se puede llegar a registrar valores muy altos de turbidez de entre los 2000 a 5000 UT en la fuente de abastecimiento (López & Polo, 2016), lo cual dificulta la tratabilidad del recurso.

De acuerdo con la capacidad de absorción de materia orgánica de la macrófita *Eichhornia crassipes*, permite integrar estrategias de control de esta especie por parte de las autoridades ambientales, teniendo en cuenta que esta especie pasa de ser benéfica para el ecosistema una vez deja de absorber materia orgánica, para pasar a aportar sedimentos por su descomposición en el sistema (Rodríguez, 2004), lo cual repercute dentro de las condiciones de tratabilidad del agua cruda que abastece a la planta de tratamiento de agua potable (PTAP)- Tibitoc (CAR, 2014).

Considerando lo anterior, se puede establecer que la implementación de un modelo matemático fundamentado en la ecuación logarítmica de Malthus y logístico de Verhulst buscan predecir la densidad en el tiempo y la producción de biomasa (Rodríguez, 2004). Sumado a esto, es necesario cuantificar dentro de un sistema cerrado (como lo son las cámaras de desarrollo vegetal) la materia orgánica que es capaz de asimilar la especie por medio de la oxidación tanto química como biológica de este tipo de elemento disuelto, a partir de la tasa promedio de remoción de materia orgánica efectuada por el Buchón de Agua, siendo este el motivo por el cual se usan los métodos analíticos de DBO₅ y DQO. Respecto a la correlación de la producción de biomasa y la capacidad de absorción de materia orgánica se pretende determinar y sugerir el período en el cual la especie debe ser removida del cuerpo de agua, de acuerdo a su utilidad en el ecosistema.

El cálculo de absorción de materia orgánica por parte de la macrófita, se relaciona con la acumulación de masa en peso seco resultante del crecimiento del Buchón de Agua, analizado por medio de la ganancia de biomasa de la población a prueba (Rodríguez, 2004), para lo cual la implementación tanto del modelo logarítmico de

Malthus, como del modelo logístico de Verhulst son ideales, sabiendo que el primero involucra la suposición de que la rapidez de crecimiento es proporcional a la población presente en cualquier época del año, ya que se asume que el buchón se instala en condiciones ideales respecto a depredadores, parásitos o fenómenos climáticos (Rodríguez, 2004), lo que permite establecer la densidad en un tiempo dado ($N_{(t)}$) definiendo la biomasa por unidad de área, de modo que se involucra la tasa de crecimiento específico (r), densidad (N) y tiempo (t).

Para el segundo, se ajusta el parámetro de capacidad de carga (K) a las anteriores variables para determinar de esta manera la densidad de población en el tiempo ($N_{(t)}$), lo que se traduce en la tasa de crecimiento, debido a que este tipo de modelo se adapta a las curvas de crecimiento para poblaciones en estado natural, como controlado (Rivera, 2011).

En Colombia, el uso de macrófitas como mecanismos de absorción de materia orgánica no ha tenido gran relevancia a causa de la ausencia de información específica respecto a su potencialidad como iniciativa biotecnológica para aguas contaminadas en cuerpos lóticos (Giraldo & Garzón, 1998), sumado a la baja capacidad de acumulación de biomasa por parte de este tipo de vegetación, se hace necesario implementar actividades de remoción periódica de las poblaciones conformadas en corto tiempo, por causa de la eficiencia de adaptabilidad de ésta especie en los ecosistemas acuáticos (Rial, 2013).

Es preciso destacar que, pese a que, la mayoría de los estudios consolidados desde el año 1996 hasta la fecha redundan en la eficiencia de las macrófitas en la remoción de metales, también reconocen su papel en la remoción de materia orgánica, siendo el Buchón de Agua, una vez más, la especie de mayor interés por sus características, evaluando estudios desarrollados en los departamentos de Valle del Cauca, Cundinamarca y Boyacá (Martelo & Lara, 2012).

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Desarrollar y validar un modelo matemático para la capacidad de absorción de materia orgánica de la macrófita *Eichhornia crassipes* mediante el modelo logarítmico de Malthus y el modelo logístico de Verhulst, para el sector El Espino - Río Bogotá.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Estimar la capacidad de carga de la especie *Eichhornia crassipes* mediante la evaluación del parámetro de densidad poblacional en el experimento.
2. Determinar la capacidad de absorción de materia orgánica con la *Eichhornia crassipes* en condiciones controladas.
3. Validar el modelo de la capacidad de absorción de materia orgánica para la macrófita *Eichhornia crassipes* mediante los modelos logarítmico de Malthus y logístico de Verhulst.

4. MARCO REFERENCIAL

4.1 MARCO TEÓRICO

Se ha determinado que la incidencia dentro de un sistema léntico o lótico por parte de ciertas macrófitas, en especial el Buchón de Agua (*Eichhornia crassipes*), llega a ser positivo por su capacidad de bioacumulación de metales pesados como Arsénico, Cadmio, Cromo o Mercurio (Rodríguez & Poveda, 2016; Benítez, Calero, Peña, & Martín, 2011; Unal, 2012) y la depuración de aguas residuales (Pinzón, 2012), gracias a su tolerancia respecto a las altas concentraciones de agentes contaminantes, capacidad de asimilación (N, P, Ca, K, etc.) y a su alta tasa de crecimiento (germinación vegetativa a los 28 días) (Barrera, Suarez & Melgarejo, s.f), siendo este último el responsable de que sean categorizadas como malezas (Rodríguez, Gómez, Garavito & López, 2010).

Es necesario destacar que el desarrollo poblacional de las macrófitas, está estrechamente relacionado con la presencia de grandes concentraciones de nutrientes como nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) (Camacho, *et al*, s.f.), cuyo origen se vincula a las diferentes actividades humanas desarrolladas en el trayecto de la ronda o que emplean este sistema como sumidero final. Ejemplo de esto, es el aporte por fenómenos de escorrentía o vertimiento directo de fertilizantes, plaguicidas, estiércol de ganadería, de granjas porcícolas y/o de aves de corral, y vertido de aguas residuales domésticas por parte de municipios que aún no cuentan con un sistema de tratamiento de este tipo de aguas como Villapinzón, o las descargas de las PTAR de Suesca y Tocancipá, y de algunas industrias como las curtiembres, lo cual integra el tipo de aporte dado por el sector doméstico e industrial (EAB, 2015).

La remoción de estos nutrientes por parte de las plantas, se asocia a la transformación de la materia orgánica sometida a complejos procesos biológicos, físicos y químicos, de los cuales se destacan la sedimentación, filtración, degradación microbiológica, nitrificación y desnitrificación, decaimiento de patógenos, etc., en relación a su metabolismo (Vizcaíno & Fuentes, 2016) lo cual se ve representado en una tasa de oxidación que puede ser cuantificada como Demanda Bioquímica de Oxígeno 5 días (DBO₅) o Demanda Química de Oxígeno (DQO) (Rivera, 2011).

4.2 MARCO LEGAL

Cuando se habla del recurso agua, se pueden asociar una serie de lineamientos direccionados tanto al uso del recurso, como a la ordenación y manejo del mismo. Sin embargo, y para efectos de la presente investigación se mencionan aquellos que involucran los acuerdos y avances en torno al uso del Río Bogotá como fuente de abastecimiento de una de las plantas de tratamiento de agua potable. En ese orden de ideas y como macro en el manejo de los criterios base para la calidad de agua según su destinación, se destaca el Decreto 1594 de 1984, siendo este también importante en la medida en la que fundamenta la base de toma de decisiones en cuanto al ordenamiento y usos del recurso hídrico se refiere.

Al respecto, y de manera más específica se relaciona el Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica del Río Bogotá 2006 / POMCA Resolución CAR 3194 de 2006 al igual que el Acuerdo CAR 043 de 2006, el primero dirigido al establecimiento de lineamientos y fases para el proceso de ordenación de la Cuenca Hidrográfica del Río Bogotá, teniendo como objetivo el planeamiento del uso y manejo sostenible de los recursos naturales que componen el sistema, como también de las disposiciones de conservación. El segundo aún más puntual en la medida en la que establece los usos del agua en la cuenca alta, media y baja del Río Bogotá, enfatizando en la calidad del agua por parámetros aplicados por clases (correspondiente al número II y estación asignada con el Código: 2120-16, para la zona objeto de estudio).

Se mencionan dos lineamientos más, direccionados a la evaluación del recurso hídrico una vez se contempla la contaminación del mismo, la Resolución 00004716 de 2010, la cual indica las condiciones, recursos y obligaciones mínimas para la elaboración de los mapas de riesgo de la calidad del agua para consumo humano, aplicado especialmente a nivel de la identificación de características físicas, químicas y microbiológicas presentes en las fuentes abastecedoras, y en relación a la reducción de riesgo de deterioro de la calidad del recurso hídrico. De igual manera, se emite la Sentencia del Río Bogotá del 28 de marzo de 2014 en la cual, el Consejo de Estado ordena el diseño e implementación de medidas para evitar el aumento de los niveles de contaminación de este cuerpo de agua, permitiendo adoptar una serie de medidas que buscan la protección de la cuenca hidrográfica del Río Bogotá.

Finalmente es necesario señalar que, a nivel normativo, la disposición de acciones legales para esta cuenca está a cargo de la Corporación Autónoma Regional (CAR).

4.3 MARCO CONCEPTUAL

Las macrófitas acuáticas constituyen uno de los componentes más importantes de los ecosistemas lacustres, responsables entre tanto de la productividad primaria, del suministro de nichos para otros niveles tróficos, del reciclaje de los nutrientes y de estabilizar sedimentos (Cardenas, Herrera, & Ramos, 2012). En el marco de este proyecto se trabaja con la planta acuática ***Eichhornia crassipes***, comúnmente conocida como Jacinto o Buchón de Agua, la cual pertenece a la familia Pontederiaceae. De acuerdo con Giraldo & Garzón (1998) ésta especie presenta una de las tasas de crecimiento más altas entre las macrófitas (0,4 Kg/m²×día), lo que puede verse reflejado en el cubrimiento de la superficie del cuerpo de agua sobre cual se desarrolla. En cuanto tienen a disposición los requerimientos nutricionales favorables para su desarrollo se da lugar a la **eutrofización** entendida como el enriquecimiento del cuerpo hídrico (fuentes de agua superficial), con nutrientes disponibles que favorecen el crecimiento de las plantas; entre los nutrientes más convenientes se encuentra el nitrógeno y el fósforo.

Tal como lo destaca Moreno, Quintero & López (2010), se trata de un proceso en el que la clasificación del estado trófico del ecosistema en referencia está dada por el nutriente que plantea una limitación. La eutrofización se ve representada por la proliferación de macrófitas y algas, asociadas a los nutrientes disponibles (Zouiten, 2012). De igual manera esta, repercute tanto en sistemas lénticos como lóticos, aun cuando existe un diferencial de flujo de agua enmarcado para los dos casos; debido a que se tiene en consideración que un **cuerpo léntico** hace referencia a aquellos sistemas acuáticos caracterizados por presentar flujo o corriente baja, lo que da lugar a la formación de ecosistemas con escaso movimiento de agua como los lagos, pozos y charcas. No obstante, se estima que un sistema de este tipo puede dar lugar a un **cuerpo lótico** una vez este último se considera como un sistema que presenta una mayor velocidad de arrastre de agua en comparación con el primero, esto se logra gracias al aporte de las precipitaciones y con ello al aumento en el nivel de agua que obliga al sistema a evacuar cierta cantidad del efluente, modificando un tanto y de manera temporal su condición de léntico a lótico (García, Vera, Benetti, & Blanco, 2012).

Con el aumento y proliferación de las plantas acuáticas, es posible incurrir en el incremento de **materia orgánica**, considerada en ecosistemas acuáticos, como aquellos materiales presentes en forma de partículas, que oscilan desde tamaños macroscópicos, coloides o partículas disueltas (Fuentes, Ramos, Jiménez & Soto, 2015). Las macrófitas ofrecen una ventaja importante en la depuración de sistemas acuáticos, considerando la capacidad de absorción de materia orgánica que estas poseen.

Sin embargo, los microorganismos asociados a sus raíces en particular la acumulación de bacterias, pueden convertir la biomasa (peso de un individuo o un conjunto de individuos) de las plantas acuáticas, en una fuente de contaminación (Martelo & Lara, 2012).

La determinación de la **biomasa** constituye uno de los parámetros de interés a evaluar, puesto que relaciona el consumo de nutrientes por parte de las especies vegetales (Arnáiz, Isac, & Lebrato, 2000). De igual manera permite establecer la relación entre **peso seco** y **peso húmedo**, el primero se entiende como el peso resultante de retirar la humedad total del individuo (especie vegetal a evaluar), a diferencia del segundo que si considera la humedad de la planta para su análisis (García, Escalante, Rodríguez, & Fucikovsky, 2002).

Así mismo, tanto la Demanda Química de Oxígeno (DQO), como la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO), se pueden asociar con la valoración de la contaminación en un ecosistema acuático, considerando que la **Demanda Biológica de Oxígeno (DBO)**, está relacionada con la cantidad de oxígeno consumido durante el proceso de degradación de materia orgánica por parte de los microorganismos, la correspondencia con el Oxígeno Disuelto está dada por una relación inversamente proporcional, quiere decir, que en cuanto más altos los niveles de DBO, el Oxígeno Disuelto será menor, esto último constituye una causa de gran fundamento en la reducción de especies de fauna acuáticas, al no poseer un ecosistema propicio para su supervivencia (Sanchez , Herzig , Peters, Marquéz, & Zambrano , 2007).

Cuando se hace mención de la **Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP)**, se hace alusión a aquellas obras, equipos y materiales, que tal como lo establece el Decreto 1575 de 2007, contribuyen a la ejecución de procesos tendientes a que el agua cumpla con los requerimientos de calidad y así obtener agua potable para su posterior suministro (Ministerio de Salud, 2007). Esto último incluye la necesidad de verificar aspectos microbiológicos y fisicoquímicos que reduzca el riesgo asociado al consumo de sustancias altamente tóxicas o nocivas para la salud, teniendo en cuenta la fuente de abastecimiento que surte la PTAP (Unicef, s.f). Contrario a lo que se conoce como Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR), la cual incluye obras, instalaciones y procesos, que buscan el tratamiento de aguas excedentes de actividades domésticas, industriales, comerciales, o lo que constituirían aguas residuales (Lizarazo & Orjuela, 2013).

Es importante destacar uno de los conceptos más sobresalientes y útiles para la presente investigación, tratándose de lo que se conoce como **modelo matemático**, es así como se considera al mismo como una representación del “mundo real” de manera abstracta, quiere decir, que con este se pretende de cierta manera obtener un retrato muy aproximado de lo que se constituye como realidad (Cerqueira, 2009).

Propósito que se logra mediante el desarrollo de una serie de etapas que involucran la elección del tema a desarrollar, la recolección de datos cuantitativos e información relevante para la validación, la abstracción, mediante la selección de las variables que describen el problema, la interpretación a que dé lugar la solución analítica o numérica del modelo, y finalmente la validación del mismo (Bassanezi & Biembengut, 1997).

Para el caso de la presente investigación se hace uso de dos modelos matemáticos, haciendo referencia al modelo de Malthus y al modelo de Verhulst.

El modelo exponencial propuesto por Malthus en el siglo XIII y el cual será empleado en el presente trabajo de investigación relaciona el crecimiento poblacional expresado como una ecuación diferencial de primer orden (Cepeda, 1981). El modelo plantea el punto inicial a partir del cual se puede estudiar la dinámica de las poblaciones (Malthus, p. 115-146 1977, citado por Orlandoni 1997). El modelo propuesto por Malthus (1798), determinó que una población que no presenta restricciones se incrementaría geoméricamente, lo anterior incluye la premisa que "...no todas las especies, estaban igualmente capacitadas, y creó el concepto de **aptitud de adaptación** para expresar la calidad de la relación entre cada organismo y su ambiente" (Orlandoni, 1997). La anterior premisa, teniendo en cuenta algunos factores que hacen parte de la relación entre los organismos y el medio ambiente; entre estos se destacan la fertilidad, estrategias en la búsqueda de alimento y en la defensa y acciones de supervivencia.

Por su parte, **el modelo propuesto por Pierre Verhulst** en el año de 1838, surge a partir de la premisa de que "...las poblaciones no pueden mantener indefinidamente el crecimiento exponencial" (Meli, 1997), para lo cual se sugirió el modelo logístico que representa en últimas el crecimiento poblacional restringido, es decir la ecuación planteada incorpora una forma de evitar el crecimiento descontrolado, la relación bosqueja el momento en el cual se comienzan a usar los recursos en cuanto la población sea más grande (University of Central Florida, 2007).

La **tasa de crecimiento específica** inmersa en el análisis de la densidad, expresa el cambio absoluto de biomasa para un intervalo de tiempo. Esto se debe principalmente a que el factor de crecimiento está descrito como el incremento irreversible del tamaño, masa, forma y/o número, de una planta (u órgano) en un periodo definido (Criddle, Smith, & Hansen, 1997), y sujeto a los principios biológicos el término crecimiento vegetal, en el cual influyen diversos procesos como absorción, fotosíntesis, respiración, síntesis de nutrientes, transpiración, turgencia, etc. (Santos, Segura, & Núñez, 2010).

4.4 FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE *EICHHORNIA CRASSIPES*

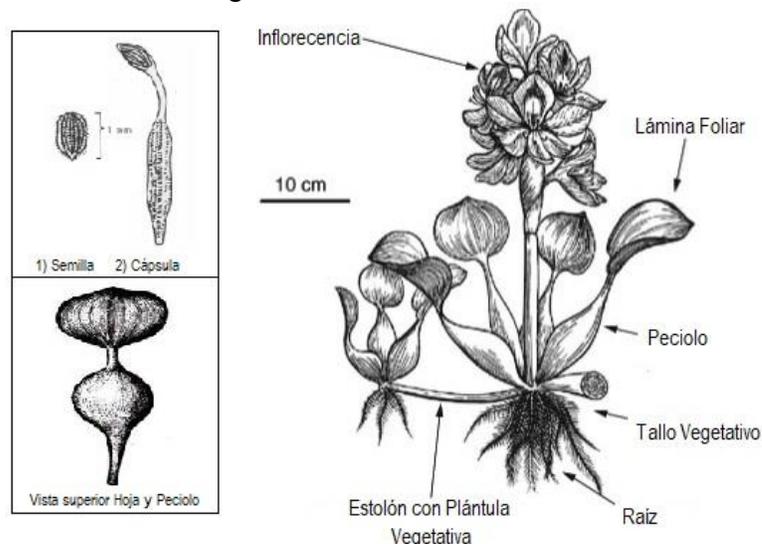
4.4.1 Morfología: de acuerdo al Inventaire National du Patrimoine Naturel (INPN), a nivel taxonómico pertenece a la familia de las Pontederiaceae Kunth (Funk *et al*, 2007) y del género *Eichhornia*, (INPN, 2018).

Estas se caracterizan por ser plantas perennes (Porras, 2017), herbáceas y libre flotante o en algunos casos fija en sustrato (Camelo, Martínez, Ovalle, & Jaimes, 2016), lo que permite enmarañar densos tapetes sobre la superficie de un cuerpo de agua (CEIBA, 2015). Los especímenes adultos se destacan por estar constituidos de estolones, frutos (semillas), hojas, inflorescencias, peciolo, raíces, rizomas, y tallo vegetativo (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**), y las plántulas jóvenes de estructuras básicas (hojas, peciolo, raíces, rizomas y tallo vegetativo) (Rodríguez, 2003).

Su tamaño varía acorde a la temperatura, disponibilidad de nutrientes y espacio, encontrándose que en la Sabana de Bogotá llega a presentar un porte entre 20 y 30 centímetros (Porras, 2017).

La raíz se caracteriza por ser una estructura fibrosa, de color negro, la cual constituye un excelente soporte a la planta (Porras, 2017), esta puede llegar a tener una longitud entre los 10 cm a más de 1 m, y representa el 20 % de la biomasa total del espécimen, dependiendo claro está, de las condiciones ambientales en que se encuentra. (Rodríguez, 2003).

Ilustración 1. Morfología de individuo adulto de *Eichhornia crassipes*



Fuente: GetDrawings, 2018.

El tallo vegetativo es una estructura horizontal alargada (Rodríguez, 2003), compuesta por un solo eje cilíndrico con internodos cortos (Funk *et al*, 2007), los cuales son punto de anclaje a las estructuras definidas como estolones o rizomas, raíces, hojas e inflorescencias de la planta (Porras, 2017).

A partir del tallo, una planta madura puede desarrollar una elongación (Rodríguez, 2003) que recibe el nombre de estolón, cuando se despliega de forma horizontal sobre la superficie (Yusti, 2012), o rizoma cuando se trata de una estructura desarrollada bajo el agua (Rodríguez, 2003), y en ambas situaciones se desarrolla una plántula en el extremo libre, la cual se independiza fisiológicamente en poco tiempo cuando se trunca esta estructura (Yusti, 2012).

El Buchón de Agua posee hojas cuya lámina presenta una forma depresovaladas, que en ejemplares jóvenes puede llegar a tener entre 6 a 20 cm de largo (Coetzee, 2012) y presentan peciolos esponjosos inflados (Funk *et al*, 2007). Ya en individuos maduros dentro de la colonia o que se han fijado al sustrato, generalmente desarrollan hojas de 50 a 90 cm de largo con folios ovaes, y peciolos cilíndricos y poco engrosados (Rodríguez, 2003; Rivera, 2018)

En relación a las espigas, para las plantas flotantes que se encuentran al borde de la colonia llega a tener una altura de 10 a 20 cm con un promedio de 5 a 12 flores (Rodríguez, 2003), y de 40 a 90 cm de largo con 40 a 60 flores aquellas que se encuentran en una porción más antigua de la misma (Coetzee, 2012).

Para finalizar, las flores presentan un color lila o violeta muy vistoso (CEIBA, 2015), las cuales pueden llegar a generar hasta 12000 semillas por individuo, con una viabilidad de hasta veinte años (Yusti, 2012).

4.4.2 Reproducción: en relación a su reproducción, se ha identificado que *Eichhornia crassipes* tiene la capacidad de propagación asexual y sexual (Rodríguez, 2003).

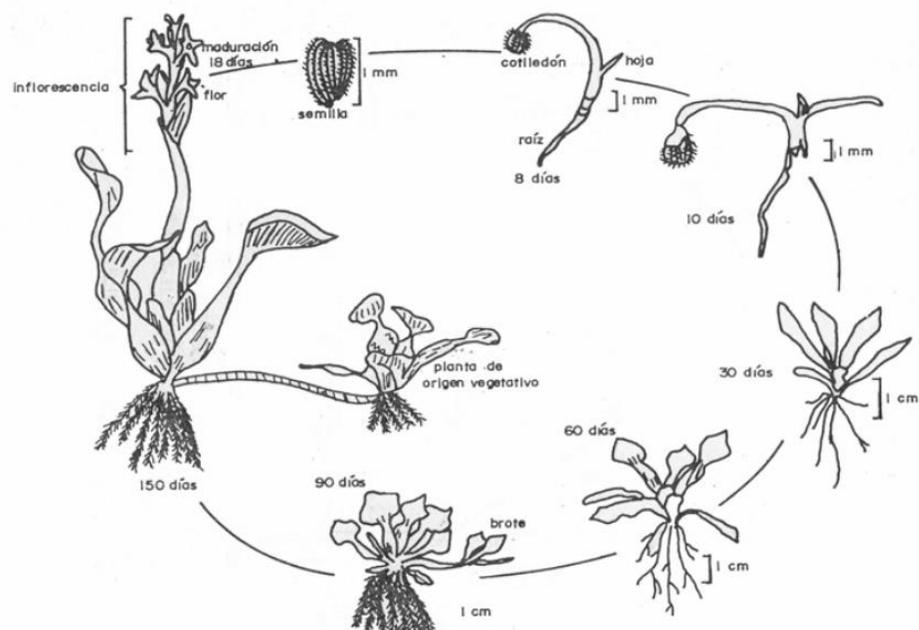
Para el caso de la asexual, los individuos generan estolones horizontales, que en su extremo libre (Yusti, 2012) desarrolla hojas arrosetadas en una yema terminal (Rodríguez, 2003), siendo este el método de más alta rapidez de reproducción, ya que la propagación de clones se repite en las plantas hijas (Coetzee, 2012), calculándose que en condiciones ideales se puede duplicar el área ocupada en 10 días (Rodríguez, 2003), e incluso que dos plantas adultas lleguen a generar una descendencia de 30 nuevas plantas hijas en un período de 23 días (Yusti, 2012).

Cuando su reproducción es sexual, las semillas dispersas tienen mayor posibilidad de germinación hasta los 40 días (Funk *et al*, 2007), cuando son dispuestas en un tapete de macrófitas, o de 40 a 90 días si se desarrollan en la superficie de agua. (Rodríguez, 2003)

Ahora bien, cuando la semilla encuentra las condiciones ideales para su germinación, tal como lo afirma Rodríguez (2003):

La primera estructura en brotar es el cotiledón cilindroidal, seguido por la raíz y las hojas. Se ha determinado que a partir de los 10 días genera entre dos a tres hojas liguiadas, a los 20 días los cotiledones desaparecen y produce de 4 a 6 hojas liguiadas y una o tres espatuladas con flotadores incipientes; a los 40 días se han formado hojas con flotadores incipientes, y finalmente a partir de los 60 días se desarrollan nuevos brotes y de aquí en adelante hay formación de estolones, rizomas, hojas y finalmente flores y frutos. (Ilustración 2. Ciclo de vida y propagación sexual y asexual de *Eichhornia crassipes* propuesto por Olvera en 1989.)

Ilustración 3. Ciclo de vida y propagación sexual y asexual de *Eichhornia crassipes* propuesto por Olvera en 1989.

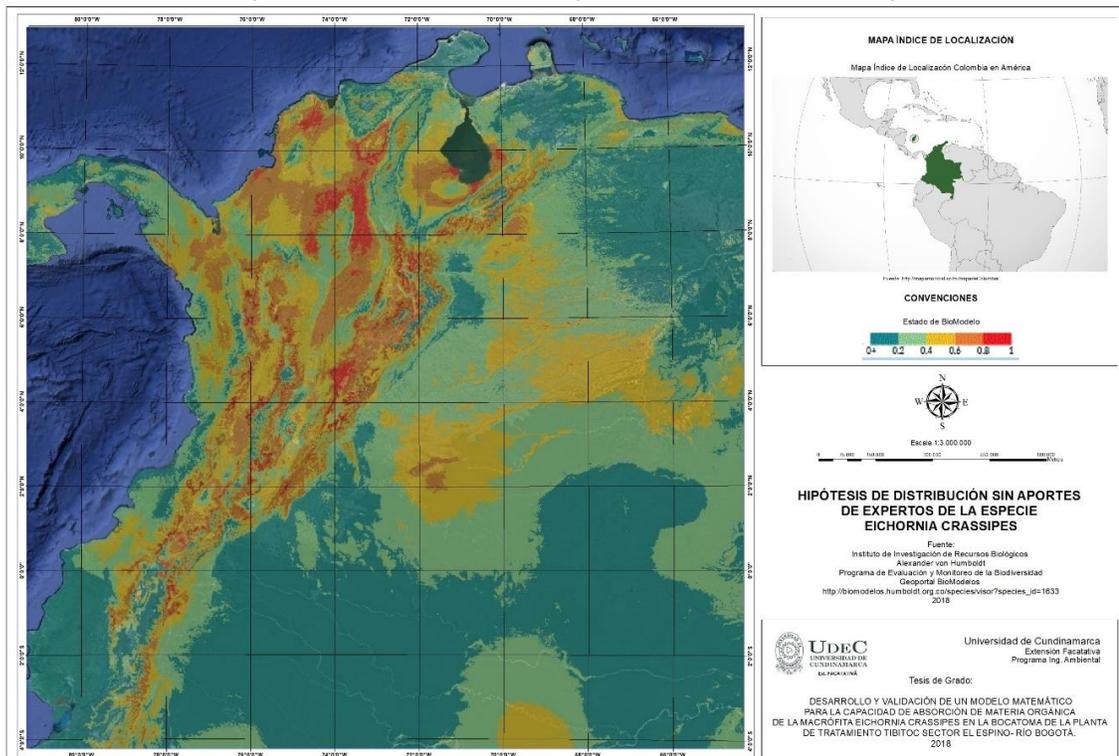


Fuente: Olvera, 1989 en Rodríguez, 2003.

4.4.3 Hábitat: se han identificado diversos ecosistemas que son habitados por esta especie de planta flotante por causa de su capacidad de adaptabilidad y dispersión (Rial, 2013), como lagos, embalses, ríos, pantanos, estanques, u otro cuerpo de agua dulce, tranquilas o en ligero movimiento, e influenciado por el nivel de eutrofización del cuerpo de agua (Rodríguez, 2003).

En Colombia, esta especie se encuentra dentro de su área natural de distribución, puesto que es nativa de la región noroccidental del país, sin embargo se incluye en la lista de especies introducidas, ya que su potencial de dispersión no ocurrió de forma naturalizada sino antropológica, por causa de poseer un amplio espectro ecológico debido a que sobrevive todo el año, coloniza ambientes cuyo flujo hídrico ha sido alterado y aprovecha aquellos componentes orgánicos de procedencia agropecuaria, doméstica e industrial, lo cual es propicio para su reproducción (Rial, 2013). Además, un poco de corriente o viento funciona para arrastrarla a otras orillas. (Yusti, 2012). En la actualidad, su distribución se concentra en mayor proporción en humedales (Porrás, 2017), vías fluviales, canales de riego, etc., de las tres cordilleras, la Orinoquia y la Amazonia colombiana (Rial, 2013), tal y como lo muestra la

Ilustración 4. Hipótesis de distribución para *Eichhornia crassipes* en Colombia.



Fuente: Biomodelos, Instituto Humbolt, 2018.

En la Sabana de Bogotá, la distribución de esta macrófita se concentra principalmente en cuerpos de agua que presentan problemas de eutrofización causados por su uso como sumideros de aguas residuales, entre los ejemplos destacables se tienen los humedales naturales que se encuentran en el sur de

Bogotá, como Tibanica, La Vaca, Burro y Techo (Escobar, 2012), los ríos como el Tunjuelo y Bogotá (UNAL, 2009), y embalses como Tominé (Gómez, 2005) y el Muña (Revista Semana , 2017).

Se debe destacar que la limitación de su colonización está dada por la temperatura ambiente, ya que el gradiente adecuado para su desarrollo se encuentra entre los 20 y 30 °C, aunque en invierno con protección puede llegar a crecer en 10 °C. (Porras, 2017)

5. DISEÑO METODOLÓGICO

En el presente capítulo se presenta el procedimiento empleado durante el transcurso de la investigación en relación al diseño experimental y muestral, descripción de la zona de estudio y las características del material vegetal colectado y empleado dentro del muestreo.

La fase experimental de la investigación se desarrolla en la zona colindante entre la ribera occidental del Río Bogotá con el predio privado nominado Marsella. Inicialmente se consideró instalar los puntos de monitoreo entre la Bocatoma Norte y la Bocatoma Sur de la Planta de Tratamiento de Agua Potable Tibitoc, pero por cambios en la jurisdicción administrativa de la Concesionaria PTAP Tibitoc a la Empresa de Acueducto de Bogotá (EAB) dada el 22 de marzo de 2018 (Rivera, 2018), es denegada la solicitud de permiso por motivo de adecuación y mantenimiento tanto de las instalaciones como del canal hidráulico en ese tramo, lo cual obliga su traslado a 1500 m aguas arriba de la Bocatoma Sur, siendo el punto de recolección de los datos la zona identificada con el recuadro amarillo en la Ilustración 4. Partiendo de esto, la distancia entre el punto considerado inicialmente y en el que se instalan las unidades experimentales no marca gran diferencia a nivel hidroclimático, de la distribución poblacional de la macrófita estudiada a lo largo del espejo de agua, o por presencia de puntos de descarga de aguas residuales (de acuerdo al recorrido realizado el 23 de abril de 2018), puesto que el trayecto del cauce en este sector toma una forma meándrica irregular (Ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Zona de recolección ronda Río Bogotá, en el sector El Espino-Tocancipá Cundinamarca, durante el 22 de abril al 22 de agosto de 2018 & Anexo 1.1).

Ilustración 5. Zona de recolección ronda Río Bogotá, en el sector El Espino-Tocancipá Cundinamarca, durante el 22 de abril al 22 de agosto de 2018



Fuente: Google maps, 2018.

5.1 DISEÑO EXPERIMENTAL

Para establecer la relación biomasa respecto a la absorción de materia orgánica mediante la validación del modelo matemático, es necesario instalar como sistema de control sobre el cauce del Río Bogotá (*in situ*) cuatro limnocorrales con área de 1m^2 , y como unidades experimentales tres cámaras de desarrollo vegetal con área 1m^2 y altura de 50 cm en la ribera del río, en las cuales se realiza la siembra de siete individuos por cuadrante y evaluando cada 15 días por siete periodos las variables la biomasa (P) y densidad poblacional (N) de las cuales se determina la Capacidad de Carga (K), la Constante de crecimiento relativo de la población (C) y la Tasa de crecimiento específico (r), involucrados en las ecuaciones logarítmica de Malthus y logística de Verhulst. Así mismo cada 30 días, se analizan los parámetros de DBO_5 y DQO en los reactores para identificar el contenido de materia orgánica dispuesto en el medio. Esto permite tener una aproximación del comportamiento de la materia orgánica a lo largo del ciclo de vida del Buchón de Agua de acuerdo al crecimiento de la especie, siendo el grupo experimental la unidad con la cual se puede establecer esta relación y así indicar *in situ* la ocurrencia del fenómeno.

5.2 METODOLOGÍA

5.2.1 Delimitación espacial: la zona experimental se encuentra ubicada en la ribera occidental del Río Bogotá sector el Espino, vereda Tibitoc del municipio de Tocancipá en el departamento de Cundinamarca, colindando al occidente con el predio privado identificado como Marsella (CAR, 2018), al noroccidente con terrenos de protección de ronda denominado el Pantano propiedad de la Empresa de Acueducto de Bogotá (EAB) y predios de la Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP) Tibitoc, al oriente y nororiente con el parque temático Finkana y al suroccidente con los predios de la empresa Camco. (Ver Ilustración 6. Ubicación grupos control y experimental en el predio Marsella, Río Bogotá – sector El Espino, durante el 22 de abril al 22 de agosto de 2018 & Anexo 1,2) **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

La investigación se desarrolla mediante la instalación de dos unidades experimentales, la primera constituida por un grupo control *in situ*, que integra 4 limnocorrales representados por los círculos amarillos en la Ilustración 5, y la segunda por un grupo experimental, asociado con un sistema aislado que corresponde a 3 cámaras o reactores de desarrollo vegetal, identificable en la Ilustración 5 con el cuadro blanco.

Ilustración 7. Ubicación grupos control y experimental en el predio Marsella, Río Bogotá - sector El Espino, durante el 22 de abril al 22 de agosto de 2018.



Fuente: Google maps, 2018.

Entre el 20 de abril al 20 de agosto de 2018, a 1500 m aguas arriba de la bocatoma sur de la Planta de Tibitoc, se ejecuta la fase de experimental de la investigación, cuyo propósito es la obtención de datos durante siete períodos de monitoreo (0, 16, 31, 46, 61, 76 y 92 días), que permiten obtener los datos numéricos para alimentar los modelos matemáticos de Malthus y logístico de Verhulst, en atención al comportamiento de *Eichhornia crassipes* vinculado con la producción de biomasa y densidad respecto a la absorción de materia orgánica.

5.2.2 Unidades de monitoreo: la configuración del diseño experimental requiere de la instalación de dos grupos o también llamadas unidades experimentales, para monitorear los cambios de los individuos analizados en un ambiente *in situ* y otro aislado.

La implementación del sistema *in situ* está constituido por cinco etapas, las cuales se presentan a continuación:

1. *Determinación de los lugares de muestreo*: la selección de los puntos de instalación de los cuatro (4) limnocorrales en la ribera occidental del Río Bogotá, se realiza considerando el predominio, y la compactación por fuerza del viento de la *Eichhornia crassipes*, al igual que su accesibilidad.

2. *Construcción de corrales*: se construyen 4 marcos sumergibles con compartimentos igual a 1 m², cuyo propósito es confinar la muestra de vegetación en las áreas determinadas, para evitar su arrastre por causa de la corriente, adicional, se considera que por cada cuadrante principal se debe instalar uno secundario como sistema de respaldo contra cualquier eventualidad que pueda afectar la recopilación de datos del principal como se muestra en la figura derecha de la Ilustración 6.

Por este motivo, los limnocorrales son construidos por pares, con tubería y accesorios (codos y tees) de PVC, de media pulgada (1/2") de diámetro, los cuales son soldados con pegamento de tubería dejando aire en el interior para asegurar su flotabilidad.

Ilustración 8. Construcción de corrales (fotografía costado izquierdo) y plano de diseño por cuadrante (figura costado derecho) de la unidad de control.



Fuente: Fotografía y plano por autores.

3. *Instalación*: en relación a la disposición de los cuadrantes en el espejo de agua, se debe despejar la zona de objetos flotantes o material vegetal, ya sean especímenes jóvenes de la especie estudiada u otras macrófitas. Ahora bien, las estructuras definidas como limnocorrales, son instauradas en dos puntos que contemplan el estilo de invasión de la especie. La primera corresponde al borde de la colonia del buchón, en la cual el predominio está dado principalmente por plantas jóvenes donde se montan los limnocorrales A y B, y la segunda en una porción dentro de la colonia, en la cual se instalan los corrales C y D.

4. *Siembra*: se siembran siete (7) individuos jóvenes sin retoños, con tamaño uniforme de 3 a 6 hojas, en cada cuadrante y pesados previamente.

5. *Muestreo*: corresponde a la colección de datos de peso fresco y características alométricas durante los siete períodos de monitoreo. Para obtener el dato de peso fresco se deja escurrir el material examinado por cuadrante durante 30 minutos, seguido de disponerlo en bolsas negras, con el fin de restringir el desarrollo de los especímenes por el suministro de energía fotosintéticamente activa (Cardona *et al.*, 2008). Las sub muestras son destinadas finalmente para análisis en laboratorio.

Con el propósito de estimar en el grupo de control los cambios de biomasa por unidad de área y tiempo, al igual que la densidad, el diseño muestral está centrado en la determinación del número mínimo de estructuras (limnocorrales) que se deben instalar para el levantamiento de estos datos.

El número de limnocorrales se define mediante la metodología establecida por los *Standard methods for the examination of water and wastewater*, numeral 10400. Macrophytes, en relación a un muestreo aleatorio simple para una población de comunidades vegetales no contiguas, donde se establece que el "...número de estaciones requeridas para obtener una estimación de la verdadera media de la población con un determinado nivel de confianza y error permisible, puede determinarse aplicando los datos de un estudio previo para la siguiente *Ecuación 1. Número de estaciones requeridas*" (Standard Methods, 2005):

$$N = \left(\frac{t \times \delta}{d \times \bar{x}} \right)^2 \quad (1).$$

Donde:

N = número de estaciones o unidades de muestreo.

t = en un nivel de probabilidad dado; porque N es desconocido, establece $t = 2.0$.

δ = desviación estándar del estudio anterior.

\bar{x} = estimador de la verdadera media de la población que suele determinarse mediante la realización de un estudio previo.

d = error permisible de la última media; $d = 0.1$ es recomendado para estudios de vegetación ($\pm 10\%$).

Tomando como datos de estudio previo la información obtenida en la tesis "Utilización de macrófitas acuáticas para la remoción de nutrientes y metales en aguas destinadas al consumo humano - Caso Planta de Tratamiento de Tibitoc" del Magister en Ingeniería Civil Diego Fernando Rodríguez Ospina, ya que es la única investigación que se enfoca en estudio del comportamiento de la *Eichhornia crassipes* en inmediaciones de la zona de estudio, esta presenta como desviación estándar de las diferencias de las medias 3.175 según su distribución normal, y una media de 32.9 en referencia a la densidad promedio bajo consideraciones específicas de la dársena. (Rodríguez, 2003)

Sustituyendo en la ecuación 1:

$$N = \left(\frac{2,0 \times 3,175}{0,1 \times 32,9} \right)^2$$

Se obtiene:

$$N = 3,73$$

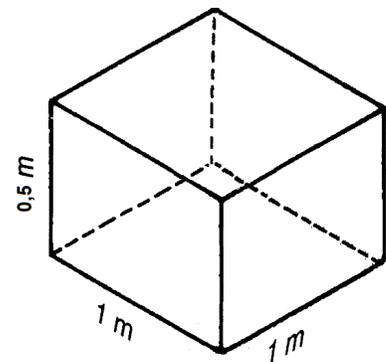
$$N \approx 4$$

Si se interpreta a N como la cantidad de estaciones para que sea representativa la muestra, entonces se debe tener instalados en la zona de muestreo 4 limnocorales, constituidos por dos cuadrantes de 1m^2 cada uno, de los cuales uno funciona como respaldo, y catalogados alfabéticamente de la A a la D según su posición en el transcurso del río.

Por otra parte, las características técnicas establecidas para las estructuras sujetas a la unidad experimental confinada, son adaptadas de la metodología empleada por Rodríguez, Gómez, Garavito y López (2010), en relación al diseño de reactores usados en la comparación de la efectividad del tratamiento entre el buchón y la lenteja de agua para aguas residuales domésticas, aplicando para este caso las etapas de:

1. *Montaje*: se instalan tres (3) tanques cuadrados de PVC con una altura de 50 cm por área de 1 m^2 , como se muestra en el plano de la Ilustración 7, en una porción nivelada de terreno e incidencia de sombras por estructuras o árboles.

Ilustración 9. Reactores de desarrollo poblacional (fotografía costado izquierdo) y plano de tanque rectangular (figura costado derecho) de la unidad experimental.



Fuente: Fotografía y plano por autores.

2. *Cerramiento*: para evitar la interferencia de animales en el experimento, se construye un cerramiento con alambre de púas alrededor de esta unidad, de 1,8 m de altura y con una periferia de 1 m de distancia a lo largo y ancho del grupo de tanques.

3. *Alimentación*: el sistema se alimenta una sola vez, al inicio de la instalación de todas las zonas monitoreo, con agua extraída del río, la cual es transportada a un balde de 30 l, debido a que esto permite identificar la materia orgánica absorbida por los especímenes evaluados en el transcurso del tiempo del ensayo.

4. *Siembra*: se utilizan plantas con una edad aproximada de dos meses de desarrollo vegetal, en similares condiciones de peso y una densidad de siembra de seis (6) individuos por cuadrante.

5. *Muestreo*: adicional al monitoreo físico, se realiza la toma de muestras de agua, durante cuatro períodos (0, 31, 61 y 92 días). Estas consisten en muestras compuestas (ISN, 2011), extraídas de los tanques en recipientes de polietileno de 1000 ml y refrigeradas a 4°C, las cuales son preservadas con 2 ml ácido sulfúrico (H₂SO₄) al 1% (ISN, 2011) y analizadas en los laboratorios de la Universidad de Cundinamarca de la extensión Facatativá y el laboratorio CIAN certificado por el IDEAM.

Para el caso del grupo experimental, se establece la cantidad reactores de desarrollo vegetal mediante la ecuación de único estrato, adaptada de los principios básicos del muestreo de carbono y biomasa de sistemas forestales (Porro, Chacón, & Rüginitz, 2009) como principal metodología para establecer el numero de estaciones partiendo de un grupo control, dicha ecuación se muestra a continuación:

$$n = \frac{(N \times \delta)^2}{\frac{N^2 \times E^2}{t^2} + N \times \delta^2} \quad (2).$$

Donde:

n = número de reactores de desarrollo vegetal.

E = error permitido (promedio x nivel de precisión seleccionado). Como se nombra anteriormente, el nivel de precisión recomendado es de $\pm 10\%$ (0,1).

t = muestra estadística de la distribución t para un nivel de 95% de confianza (generalmente se utiliza 2 como número de muestra).

N = parcelas en el área del estrato (longitud de distribución del grupo de control dividido por el tamaño total del cuadrante instalado en la zona de estudio).

δ = desviación estándar del estudio anterior.

Debido a se poseen los datos de E , t y δ de los cálculos establecidos para el grupo de control, correspondiente al número de parcelas en el área del estrato (N), se define con relación a la distribución de los limnocorales en el río, que corresponde a aproximadamente 18 m dividido en el tamaño de cada cuadrante correspondiente a 2m^2 .

Sustituyendo en la ecuación 2:

$$n = \frac{(9 \times 3,175)^2}{\frac{9^2 \times 3,29^2}{0,95^2} + 9 \times 3,175^2}$$

Se obtiene:

$$n = 2,63$$

$$n \approx 3$$

Si se interpreta a n como la cantidad de cámaras para que sea representativa la muestra, entonces se debe instalar tres (3) reactores de desarrollo vegetal de monitoreo, en la zona de estudio.

5.2.3 Variables: A continuación, se presenta los métodos ejecutados para la estimación de las variables anteriormente nombradas, y aplicados en el grupo de control y en el experimental.

a) *Ganancia de Biomasa (P)*: el factor de ganancia de biomasa se analiza mediante la acumulación del material vegetal previsto en peso seco dado en unidad de gramo por sub muestra, puesto que su estimación con el peso fresco o húmedo involucra tergiversaciones de su contenido porcentual de materia (Di Benedetto, Tognetti, 2016), ya que una proporción representativa de fotoasimilados almacenados puede ser transitoria. (Cardona *et al.* 2008).

Partiendo de esta premisa, se debe considerar que es imposible medir el peso seco de un mismo individuo en distintos períodos experimentales, ya que este es un método destructivo, por tanto, el parámetro es calculado a partir del muestreo de diferentes plantas que corresponden al mismo cuadrante durante la ejecución del ensayo (Di Benedetto & Tognetti, 2016), es por esto que en primera instancia se determina un valor de *peso seco* en el período de monitoreo, que al conjugarse con el valor de la *superficie cubierta* en ese intervalo, se puede obtener la *Biomasa seca*.

Peso seco: inicialmente, por cada muestreo se extrae una sub muestra que equivale al 14% de la población del cuadrante (y que no involucra los individuos que conforman el marco de respaldo), para identificar la *productividad* en cada período (Russo, 1983), cuyo peso en campo se contempla como peso fresco de sub muestra, y finalmente se lleva al laboratorio para su tratamiento.

Este se estima mediante la implementación del método *peso seco* determinado por los *Standard methods for the examination of water and wastewater*, numeral 10400. Macrófitas, que consiste en exponer la submuestra (no menor al 10% de la población empleada en el experimento), a un proceso de deshidratación en horno durante 48 horas a 105°C, y una posterior desecación con mufla a 500°C por 30 minutos, hasta lograr un peso constante. Con estos datos, se emplea la ecuación 2 para determinar el valor de peso seco en cada intervalo de monitoreo por submuestra (Standard Methods, 2005).

$$\text{Peso seco} = \left(\frac{\text{Peso seco sub muestra}}{\text{Peso fresco sub muestra}} \right) \times \frac{\text{Peso fresco muestra}}{\text{muestra}} \quad (2).$$

Donde:

Peso seco sub muestra = corresponde al peso constante de la sub muestra, obtenido de la práctica de desecación con mufla, (gr).

Peso fresco muestra = promedio de los pesos frescos del respectivo cuadrante para cada intervalo de monitoreo, (Universidad de Sevilla, 2008) (gr).

Peso fresco sub muestra = peso fresco en gramo de la sub muestra evaluada (gr).

Los datos obtenidos son registrados dentro de la hoja de cálculo Datos crudos y la de Biomasa experimental. (Ver Anexo 2 a 5)

Biomasa seca: esta se calcula multiplicando el peso seco por la superficie cubierta estimada para cada intervalo de tiempo, y están dadas en unidades correspondientes a masa por área ($\text{gr} \times \text{m}^2$) (Gutiérrez, 1898), como se muestra en la ecuación 3.

$$\text{Biomasa seca} = \left(\text{Peso Seco} \times \frac{\text{Superficie}}{\text{ocupada}} \right) \quad (3).$$

Donde:

Peso seco = es la unidad de peso restante de retirar toda la humedad del espécimen y determinada en el numeral anterior para cada sub muestra (gr).

Superficie ocupada = es la unidad en superficie calculada como superficie cubierta del muestreo total en cada intervalo de monitoreo (m^2).

La estimación de la *superficie cubierta* se obtiene mediante la sumatoria del área flotante del peciolo (ver *Tasa de crecimiento, Área foliar y área flotante de peciolo*), puesto que, es la estructura encargada de dar flotabilidad al espécimen y determina la superficie real que ocupa la planta en la superficie del cuerpo de agua (Cardona *et al*, 2008; CEIBA, 2015).

Para finalizar, los datos estimados de biomasa seca en los siete períodos de monitoreo de las respectivas unidades son registrados en los Anexos 4 y 5, los cuales son evaluados con los parámetros estadísticos de promedio y desviación estándar para cada intervalo de monitoreo (Porro, Chacón, & Rüginitz, 2009), siendo este último el que permite indicar la variación en la ganancia de masa para cada grupo (Di Benedetto & Tognetti, 2016).

Área flotante: esta se obtiene mediante la técnica de relaciones alométricas, (Santos, Segura, & Núñez, 2010) que consiste en determinar para cada peciolo, la medida de la longitud establecida entre el tallo y la base de la hoja (LP) y el mayor diámetro transversal (CP) del mismo. (Pitelli & Marchi, 2003)

Puesto que no es posible el uso de analizadores, planímetros u otros equipos medidores de área, y el empleo de técnicas destructivas dificultan la recolección de otros parámetros, ya que requieren de una gran concentración de por cada monitoreo (Cabezas Gutiérrez, Peña, Duarte, Colorado, & Lora, 2009), se recurre a las ecuaciones lineales para la estimación del área flotante del peciolo, siendo la ecuación de regresión lineal del tipo $y = a + bx$ la que mejor se ha ajustado para este tipo de cálculos y se ha implementado para la *Eichhornia crassipes* en estudios previos (Pitelli & Marchi, 2003).

Para determinar el área cubierta por individuo, la ecuación regresión lineal $y = a \times (bx)$, (Pitelli & Marchi, 2003), se ejecuta para cada peciolo que compone al espécimen, y se realiza la sumatoria de las áreas por órgano para estimar el área flotante total en cada cuadrante durante los siete períodos de monitoreo para las dos unidades, las cuales son evaluadas estadísticamente por medio del coeficiente de correlación (R^2) y determinación, que establece la confiabilidad de la estimación del área. (Ver Anexos 8 y 9)

En relación a la interpretación de la ecuación lineal para la estimación del área flotante, y equivale al crecimiento de la circunferencia del peciolo (CP), y x a la longitud de este órgano (CL), donde el coeficiente a representa el tamaño de la circunferencia del peciolo inicialmente y b la rapidez de crecimiento de la magnitud entre circunferencia y longitud.

b) Densidad poblacional (N): para este caso, la densidad se evalúa implementando la técnica de cuadrantes, la cual consiste en contar en cada limnocorral o reactor, el número de individuos presentes en la unidad de área que conforma cada marco, durante los siete intervalos de monitoreo (Rodríguez, 2003 & Standard Methods, 2005).

De acuerdo a esto, se realiza una estimación de densidad relativa (individuos/m²), la cual permite evaluar la concentración con que el buchón pobló la unidad de área dentro del experimento (Rodríguez, 2003) usando la ecuación 4 (UBA, 2016), lo que permite determinar su abundancia por cuadrante de acuerdo al número de estaciones de muestreo en cada unidad de los grupos.

$$\text{Densidad relativa} = \frac{(s^{-1} \times \sum ni)}{a} \quad (4).$$

Donde:

s = es el número de estaciones de muestra por cada unidad.

ni = número de individuos contados en cada estación por intervalo de tiempo (individuo).

a = área de diseño de cada unidad muestral (m²).

Esta información es registrada en los Anexos 6 y 7, para los siete períodos de muestreo.

Por otra parte, es necesario para la determinación de los componentes relacionados con los modelos matemáticos, analizar la densidad a partir del

crecimiento de los individuos dado en peso seco (Rodríguez, 2004), es decir, vista como el producto entre la densidad relativa y el peso seco para cada monitoreo, como se presenta en la ecuación 5 (Morlans, 2004) y cuyas unidades están dadas en (individuo×gr)/m².

$$\text{Densidad} = (DR \times PS)$$

(5).

Donde:

DR = la densidad relativa (individuo/m²).

PS = peso seco estimado en el numeral de biomasa para cada sub muestra (gr).

Por último, los datos calculados bajo el concepto de *densidad* son tratados estadísticamente mediante la determinación del promedio y la desviación estándar para obtener el coeficiente de variación, que permite comparar la dispersión entre los períodos distintos de monitoreo, estableciendo cuanto menor es el valor de CV%, mejor es el modelo (Porro, Chacón, & Rüginitz, 2009), y estando registrados en los Anexos 6 y 7 para las unidades de control y experimental.

Adicional al cálculo de las variables asociadas con la especie, es necesario definir un parámetro que permita cuantificar la capacidad de absorción de materia orgánica por parte de la *Eichhornia crassipes*, la cual es analizada en el grupo experimental, en términos de Materia Orgánica absorbida en agua, que se relaciona durante el ciclo de vida dado por el experimento, exclusivamente en los reactores.

c) *Materia orgánica absorbida*: está dada mediante la valoración de materia orgánica consumida por los especímenes de *Eichhornia crassipes*, dentro de las cámaras de desarrollo vegetal, y vinculados como grupo experimental. Su cuantificación se realiza mediante los parámetros de Demanda Biológica de Oxígeno a los cinco días (DBO₅) y la Demanda Química de Oxígeno (DQO).

Inicialmente la manipulación de las muestras obedece a una clásica cadena de custodia, en la cual el material recolectado se almacena en una nevera portátil la cual las conserva en frío (4°C) durante el desplazamiento desde el lugar de la toma de la muestra hasta el laboratorio en referencia.

Para determinar la DBO₅, se recurrió a contratar el análisis de laboratorio y cuyo resultado fuera verídico, para tal fin se hizo uso de un laboratorio acreditado por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales- IDEAM.

Para la valoración de este parámetro el laboratorio empleó el método señalado en los *Standard methods for the examination of water and wastewater*, numeral.5210 B-ASTM D888-09 MET.C, cuyo principio consiste en llenar una botella hermética con la muestra de agua para ser incubada a temperatura específica durante 5 días, la DBO se calcula con la diferencia del dato de Oxígeno Disuelto inicial y final.

Respecto al análisis de la DQO, el laboratorio efectuó el análisis teniendo como referente el método *Standard methods for the examination of water and wastewater*, numeral. 5220 C, este se basa en el principio que las sustancias orgánicas e inorgánicas oxidables que se encuentren presentes en la muestra, se oxidan a partir de reflujo cerrado haciendo uso de una solución de ácido sulfúrico (H_2SO_4) con un exceso de dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$), con el uso de sulfato de plata (Ag_2SO_4) el cual se emplea como catalizador, y de sulfato mercuríco ($HgSO_4$) el cual se utiliza para eliminar la interferencia de los cloruros. Una vez se lleva a cabo el proceso de digestión, el dicromato de potasio residual ($K_2Cr_2O_7$) se titula con sulfato ferroso amoniacal para determinar la cantidad de dicromato de potasio consumido (American Public Health Association, 1999).

A partir de los resultados obtenidos en los muestreos efectuados por el laboratorio respecto al análisis de los parámetros DBO_5 y DQO, se aplica la ecuación 6 a fin de calcular la eficiencia de remoción para cada uno de los dos parámetros en relación.

$$E = \frac{(S_0 - S)}{S_0} \times 100 \quad (6).$$

Donde:

E = eficiencia en remoción de DBO_5 o DQO, en %.

S_0 = concentración de DBO_5 o DQO en el afluente (mg/L).

S = concentración de DBO_5 o DQO soluble en el efluente (mg/L).

Cabe resaltar que se aplica esta metodología una vez las muestras de agua analizadas paralelamente al muestreo en laboratorio y cuya comparación se pretendía efectuar a partir de los resultados de la lectura del espectrofotómetro, pero del cual no se obtuvieron con éxito debido a problemas de tipo técnico y profesional en el uso del instrumento, repetir el análisis implicaba incurrir en gastos económicos adicionales que no podían ser asumidos.

5.2.4 Modelo logarítmico de Malthus y logístico de Verhulst: De acuerdo al modelo diferencial propuesto por Malthus, para la población de la *Eichhornia crassipes*, la expresión logarítmica se representa como sigue (Rodríguez, 2003):

$$N_{(t)} = N_0 e^{rt} \quad (7).$$

Donde:

$N_{(t)}$ = corresponde a la densidad en un tiempo t (gr/m²).

r = tasa de crecimiento específico (día⁻¹)

N_0 = promedio de la densidad inicial en el tiempo de cada cuadrante en su respectiva unidad de control o experimental (individuo×gr/m²).

t = tiempo respecto a los intervalos de monitoreo correspondientes a cada quince días (días).

Este modelo involucra la suposición de que la rapidez de crecimiento en cualquier intervalo es proporcional a la población presente, en la cual, en el tiempo cero se parte de una densidad del buchón N_0 y esta crece permanentemente. (Rodríguez, 2003)

En cambio, el modelo logístico de Verhulst representa mejor el comportamiento de las comunidades de especies, teniendo en cuenta que se adapta bien a las curvas de crecimiento observadas en poblaciones naturales y de laboratorio (Gutiérrez, 1898). Este modelo adaptado para estimar el desarrollo en la densidad de la *Eichhornia crassipes*, se encuentra definida como sigue:

$$N_{(t)} = \frac{K}{1 + e^{c-rt}} \quad (8).$$

Donde:

$N_{(t)}$ = densidad en un tiempo t (gr/m²).

K = capacidad de carga (gr/m²).

r = tasa de crecimiento específico (día⁻¹)

C = constante de crecimiento relativo de la población.

Los valores de C , K y r son obtenidos a partir de los datos de biomasa y densidad, los cuales reciben el siguiente tratamiento tanto para el modelo a nivel natural como ajustado:

Se determina tres intervalos a evaluar, correspondientes a t_0 , t_1 , y t_2 .

Para t_0 se calcula el promedio de la densidad poblacional en la fase inicial del experimento, ósea, para el día 1 en las dos unidades. Los t_1 son determinados para la fecha en que identifica un marcado desarrollo exponencial de la acumulación de biomasa, y por cada unidad se establece su promedio (N_1), siendo para el grupo de control los datos que se estiman para el día 31 y para el experimental los del día 15.

Por último, t_2 implica la información en la que se estima el valor máximo de ganancia de biomasa, la cual se promedia por cada grupo (N_2) y correspondiendo para el caso los datos encontrados para el día 77 para el grupo de control y 31 para el experimental.

Con estos datos promedio se procede a determinar los términos de Capacidad de Carga (K), la Constante de crecimiento relativo de la población (C) y la Tasa de crecimiento específico (r), involucrados en las funciones de la ecuación logística y de Verhulst, los cuales son calculados con las siguientes ecuaciones, en el orden como se presenta:

Para la capacidad máxima de carga (K):

$$K = \frac{2 \times N_0 \times N_1 \times N_2 - N_1^2 (N_0 + N_2)}{N_0 \times N_2 - N_1^2}$$

(9).

Siendo necesario tomar para este parámetro la estimación más alta de densidad, cuando se ejecuta el modelo ajustado, ya que la ecuación arroja un valor inferior a la densidad inicial.

La constante de crecimiento relativo de la población (C):

$$C = \ln \frac{(K - N_0)}{N_0}$$

(10).

Y, la tasa de crecimiento específico (r):

$$r = \frac{1}{t_1} \ln \frac{N_1(K-N_0)}{N_0(K-N_1)} \quad (11).$$

Finalmente, con los datos obtenidos para nutrir el modelo logarítmico de Malthus y logístico de Verhulst, están registrados en el Anexo 10 - 11, donde se describe la curva de crecimiento de la *Eichhornia crassipes* para las dos unidades de monitoreo (grupo de control y experimental), y de las cuales mediante la determinación de la tasa promedio de remoción por medio de la ecuación 12 se identifica su capacidad de absorción de materia orgánica respecto al tiempo en la zona de estudio.

$$V = \frac{C_i - C_f}{N \times t} \quad (12).$$

Donde:

V = Tasa promedio de remoción;

C_i = Concentración inicial de DBO₅ (mg/l O₂);

C_f = Concentración final de DBO₅ (mg/l O₂);

N = Peso seco de biomasa en gramos;

y

t = Tiempo de exposición expresado en días.

5.3 RECONOCIMIENTO ZONA EXPERIMENTAL

De acuerdo a los estudios climatológicos y elementos climatológicos concerniente al área de estudio, reportados en la bibliografía, es preciso indicar que la zona presenta una temperatura mínima diaria aproximada de 9,8 °C y máxima diaria de 15,4° C, con una precipitación media mensual de 106 mm y entre 400 a 2200 mm anuales (CAR , 2018), siendo una zona de menor incidencia de lluvias respecto a las reportadas para otras zonas que hacen parte de la cuenca alta del río Bogotá.

Durante los meses (abril a julio) se da lugar al primer período que caracteriza el régimen bimodal de la zona, por lo tanto, las estaciones que se encuentran confluentes a la zona de desarrollo experimental, reportan valores más elevados respecto a la temperatura media; por su parte durante este tiempo las temperaturas mínimas no son tan inferiores y las máximas no tan elevadas. Además, el caudal promedio reportado por la estación “El Espino” corresponde a 4.12 m³/ s, siendo en el Anexo 19 donde se puede evidenciar el comportamiento del nivel del río en los dos últimos meses de muestreo (junio-julio).

Ahora bien, en relación a la diversidad de plantas acuáticas y flotantes, según con lo estipulado por Rodríguez (2003) en el inventario de macrofitas realizado en la tesis “Utilización de macrófitas acuáticas para la remoción de nutrientes y metales en aguas destinadas al consumo humano-Caso Planta Tibitoc”, las poblaciones que se presentan a lo largo del río Bogotá y cercanías a la planta Tibitoc, son en su mayoría de *Azulla filiculoides*, *Bidens laevis*, *Eichhornia crassipes*, *Lemna sp*, *Ludwigia peploides*, *Juncus effusus*, de las cuales la primera, tercera y cuarta son las que presentan mayor abundancia sobre el cauce y las márgenes del río, y confirmado en la actualidad (Ilustración 10. Cauce Río Bogotá de sur a norte, en la Bocatoma Norte de la Planta de Tratamiento Tibitoc para el 04 de abril de 2018.) entre el trayecto de la Bocatoma Norte a la Sur.

Esto se debe principalmente por las acciones de control llevadas hasta la fecha por las entidades territoriales y ambientales (Rial, 2013), al igual que las condiciones ambientales como la corriente y el viento (Cárdenas, Baptiste & Castaño, 2017), y la alta capacidad de reproducción y adaptación a condiciones desfavorables como la contaminación, lo que han favorecido el desarrollo de estas tres comunidades.

Ilustración 10. Cauce Río Bogotá de sur a norte, en la Bocatoma Norte de la Planta de Tratamiento Tibitoc para el 04 de abril de 2018.



Fuente: Fotografía autores.

Ya en la zona de monitoreo, a 1500 m aguas arriba de la bocatoma sur, la población del buchón de agua presenta una distribución no contigua como se observa en la Ilustración 9 (fotografía izquierda), y es evidente que el cauce aun no es completamente colonizado por alguna macrófita (fotografía derecha).

Ilustración 11. Población de *Eichhornia crassipes* en la zona de monitoreo *in situ* para el 15 de mayo (fotografía costado izquierdo) y el 01 de agosto (fotografía costado derecho) del 2018.



Fuente: Fotografías autores.

Tal y como se puede observar en la Figura 8 respecto a la Figura 9, la colmatación del sistema es representativa, lo cual dificulta el despeje manual de la superficie para la instalación de las estructuras *in situ*, puesto que la densidad y competencia entre las especies dominantes generó una maraña de raíces, en comparación a lo visto en la zona de desarrollo final del experimento.

Así las cosas, la instalación de los limnocorrales ubicados en 4 puntos a lo largo del tramo seleccionado requirió la observación en campo de los diferentes escenarios en cuanto al desarrollo de la colonia de *Eichhornia crassipes* tanto en el borde como dentro de la misma, facilidad de acceso, obtención de muestras y riesgo ante incremento en el nivel del río.

5.4 RECOLECCIÓN DE ESPECÍMENES

El material vegetal se colecta inicialmente mediante el método de recolección por rastrillo y pinzas (Standard Methods, 2005), que consiste en arrastrar y extraer los individuos visualmente jóvenes, en nuestro caso con una coladera plástica de 22 cm de diámetro, a la cual se adaptan diferentes longitudes de asa.

Mediante esta práctica se recopilan un total de 73 individuos definidos en fase de crecimiento vegetativo, los cuales pesan entre 20 a 40 gr, y con presencia de 3 a 6 hojas, sus características a nivel morfológico corresponden a la ausencia del desarrollo de estolones, una longitud de raíz inferior a 19 cm y de coloración marrón, y hojas sin manchas y/o daños en la superficie foliar o del peciolo. Este material vegetal se distribuye en cada cuadrante de los limnocorrales y reactores de desarrollo vegetal, en grupos de 6 individuos los cuales son identificados numéricamente del 1 al 6 con el fin de extraerlo según al equivalente de la fecha de monitoreo, y trasladando para laboratorio los 7 restantes como muestra inicial del día 0.

Ilustración 12. Recolección de muestras en unidades control



Fuente: Fotografías autores.

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presenta los resultados y análisis correspondientes a la estimación de los parámetros de biomasa (P) y densidad poblacional (N), que permiten hallar los valores involucrados para nutrir el modelo logarítmico de Malthus y logístico de Verhulst, relacionados con Capacidad de Carga (K), la Constante de crecimiento relativo de la población (C) y la Tasa de crecimiento específico (r), tanto en el grupo de control como en el experimental. Al igual que los estimados de DBO_5 y DQO necesarios para el cálculo de la tasa promedio de remoción que permite identificar la capacidad de absorción de materia orgánica durante el desarrollo del diseño experimental en el grupo experimental.

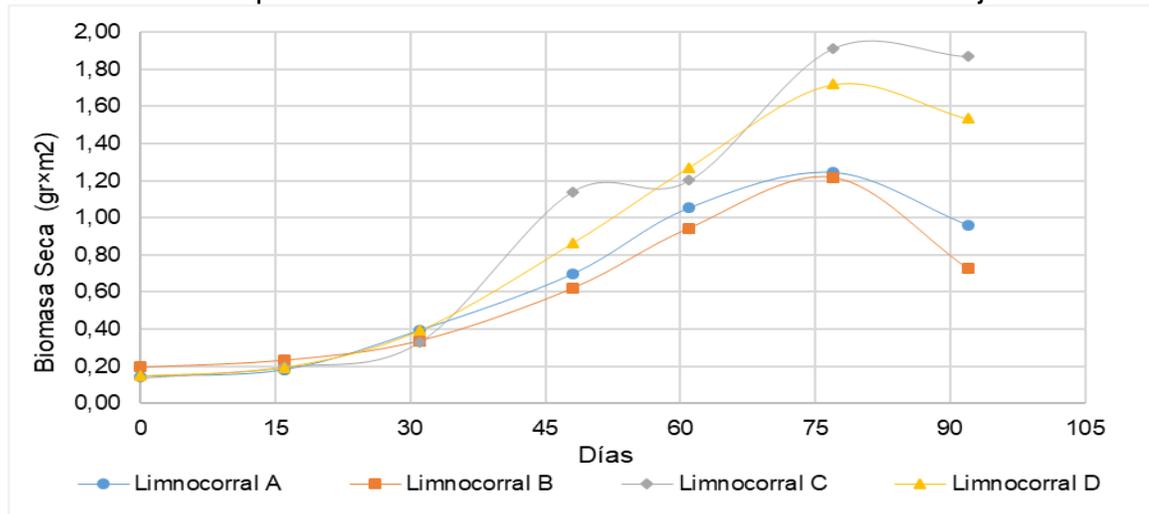
La compilación, tratamiento y estimación de los resultados en el transcurso de los siete períodos de monitoreo está sujeto al análisis matemático por medio del programa de cálculo EXCEL de Microsoft Office 2010®.

6.1 BIOMASA

La conducta ecofisiológica relacionada con la producción de biomasa representada por medio de los gráficos de dispersión 1 y 2 permite identificar que durante los siete intervalos de monitoreo del experimento (0, 16, 31, 46, 61, 76 y 92 días), la *Eichhornia crassipes* se comporta de manera similar en ambos grupos, ya que los datos estimados de este parámetro tienden a distribuirse en tres etapas o fases a nivel gráfico, y según el grupo, difieren en tiempo y ritmo de productividad por motivo de la disponibilidad de nutrientes, espacio y radicación solar fotoasimilada, reflejada en cada espécimen evaluado.

En términos generales, la primera fase corresponde a un estado inicial o de latencia en la cual la acumulación de materia vegetal es lenta y se percibe entre los días 0 a 16 en ambos grupos, seguida de una fase exponencial que refleja el incremento de la producción de biomasa y que alcanza su punto máximo en el día 75 para el grupo de control y en el día 30 para el experimental, y que finalmente termina en la fase de deceso, la cual refleja decrecimiento en la generación de masa vegetal dado por la pérdida o baja producción de biomasa, la cual se presenta a partir del día 77 al 92 para el grupo de control y del día 30 al 92 para el grupo de experimental

Gráfica 1. Ganancia de Biomasa de *Eichhornia crassipes* para el grupo de control durante los siete períodos de monitoreo entre el 25 de abril al 27 de julio del 2018.



Fuente: Autores.

En lo correspondiente al grupo de control,

Gráfica 1. Ganancia de *Biomasa de Eichhornia crassipes* para el grupo de control durante los siete períodos de monitoreo entre el 25 de abril al 27 de julio del 2018.), el comportamiento de la fase inicial manifiesta una baja acumulación de masa seca por parte de los individuos evaluados de acuerdo con el valor promedio reportado entre el día 0 y el día 16 que equivalen a 0,16 grxm² y 0,20 grxm² respectivamente, lo que demuestra un bajo incremento numérico de este parámetro (ver Tabla 1). A su vez la variación por desviación estándar para el día 0 corresponde a 0,03 y para el día 16 equivale a 0,02, atribuyéndose esta diferencia al proceso de recuperación de los especímenes por la manipulación en la siembra, al igual que su facultad de adaptarse a las nuevas condiciones de competencia interespecífica e intraespecífica por disponibilidad de nutrientes, radiación solar y espacio.

Tabla 2. Valores estimados de biomasa, parámetros de promedio y desviación estándar para los días 0 y 16, correspondiente al grupo de control de *Eichhornia crassipes* durante el 25 de abril al 27 de julio del 2018.

| Limnocorral | Biomasa día 0 (grxm ²) | Biomasa día 16 (grxm ²) |
|-------------|------------------------------------|-------------------------------------|
| A | 0,15 | 0,18 |
| B | 0,20 | 0,23 |

| | | |
|---------------------|------|------|
| C | 0,14 | 0,20 |
| D | 0,15 | 0,19 |
| Promedio | 0,16 | 0,20 |
| Desviación estándar | 0,03 | 0,02 |

Fuente: Autores

La fase exponencial inicia a partir del día 16, la cual presenta un factor de acumulación gradual de biomasa como se observa en la Tabla 2, siendo en el día 77 donde se alcanza el valor máximo de ganancia con un valor de 1,24 grxm² para el limnocorral A, 1,22 grxm² para el limnocorral B, 1,91 grxm² para el limnocorral C y 1,72 grxm² para el limnocorral D y cuyo promedio corresponde a 1,52 grxm².

Tabla 3. Valores estimados de biomasa, parámetros de promedio y desviación estándar para los días 16, 31, 48, 61 y 77 correspondiente al grupo de control de *Eichhornia crassipes* durante el 25 de abril al 27 de julio del 2018.

| Limnocorral | Biomasa día 16 (grxm ²) | Biomasa día 31 (grxm ²) | Biomasa día 48 (grxm ²) | Biomasa día 61 (grxm ²) | Biomasa día 77 (grxm ²) |
|---------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| A | 0,18 | 0,39 | 0,70 | 1,05 | 1,24 |
| B | 0,23 | 0,34 | 0,62 | 0,94 | 1,22 |
| C | 0,20 | 0,33 | 1,14 | 1,20 | 1,91 |
| D | 0,19 | 0,39 | 0,86 | 1,27 | 1,72 |
| Promedio | 0,20 | 0,36 | 0,83 | 1,12 | 1,52 |
| Desviación estándar | 0,02 | 0,03 | 0,23 | 0,15 | 0,35 |

Fuente: Autores.

El rango en ganancia de masa seca establecido entre el día 16 al 77 corresponde a 1,06 grxm² para el corral A, 0,99 grxm² para B, 1,71 grxm² para C y 1,53 grxm² para D, lo que demuestra que después de superar la fase inicial, esta especie se adapta a los factores de estrés vinculados con la competencia intraespecífica e interespecífica, permitiéndose una mayor acumulación de masa atribuida a su capacidad de crecimiento y generación de estructuras vegetativas, a medida que emplea los nutrientes y espacio disponibles en su entorno.

Ahora bien, como se puede observar en la Tabla 2 la desviación estándar de los datos aumenta su variación a medida que incrementa el valor de la acumulación de masa seca hasta el día 48 con 0,23 y disminuyendo a 0,15 en el día 61 para incrementar en el día 77 con 0,35, dándose esta anomalía a lo largo de la fase, por motivo a que los organismos evaluados no presentan una misma conducta en los cuatro limnocorrales especialmente por la influencia de la disposición de recursos como la cantidad de radiación solar y espacio disponible. Ejemplo de esto es el acentuado comportamiento del limnocorral C para periodo entre el día 48 y 61, donde se presenta una desaceleración en la ganancia de biomasa debido

a la interferencia en el número de horas luz de los especímenes al ser arrastrados al borde del cuadrante donde son cubiertos por otros individuos de la misma especie con mayor porte de hojas y peciolos, lo cual disminuye su crecimiento y limita su acumulación de masa.

Adicional a esto, un factor influyente corresponde a la disposición de las estructuras dentro de la colonia, ya que aquellos individuos que son sembrados en la zona de borde de la colonia (limnocorral A y B) están expuestos en mayor grado al estrés del sistema, como lo es el movimiento violento por fuerza del viento y la corriente, al igual que la competencia interespecífica dada por otras macrófitas y depredadores, en comparación a las que se encuentran en un área rodeada con individuos maduros y mayor porte de la misma especie (limnocorral C y D).

Por último, a partir del día 77 al 92 se presenta la fase de deceso en la cual la producción de biomasa decrece por la ineficiencia de la *Eichhornia crassipes* para acumular biomasa, ya sea desde la generación y retención de nuevas estructuras vegetativas (clones por estolones), o por el irremediable deterioro fisiológico de las estructuras encargadas tanto de dar flotabilidad (peciolos), como las especializadas en la conversión sintética (hojas).

Evidencia de esto es la reducción en los valores estimados entre los dos últimos períodos de monitoreo como se observa en la Tabla 3, decayendo en gran medida la acumulación de masa seca para el limnocorral A con 0,28 grxm², el B con 0,49 grxm², C con 0,04 grxm² y D con 0,59 grxm², y calculándose un valor promedio para el día 77 de 1,52 grxm² y para el día 92 de 1,27 grxm² en ganancia de biomasa.

Tabla 4. Valores estimados de biomasa, parámetros de promedio y desviación estándar para los días 77 y 92 correspondiente al grupo de control de *Eichhornia crassipes* durante el 25 de abril al 27 de julio del 2018.

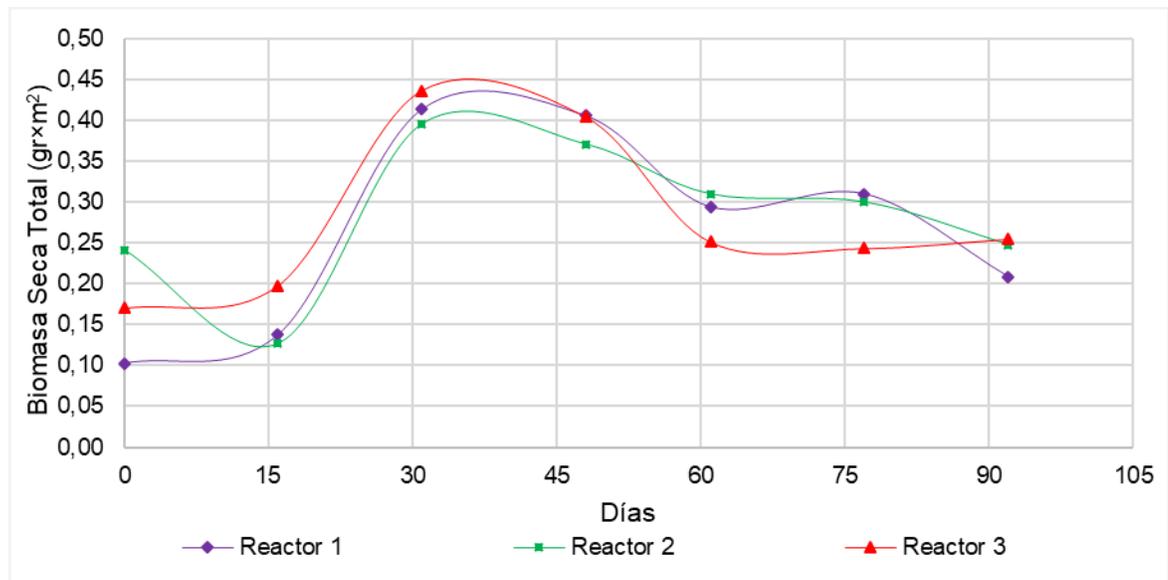
| Limnocorral | Biomasa día 77 (grxm²) | Biomasa día 92 (grxm²) |
|---------------------|--|--|
| A | 1,24 | 0,96 |
| B | 1,22 | 0,73 |
| C | 1,91 | 1,87 |
| D | 1,72 | 1,53 |
| Promedio | 1,52 | 1,27 |
| Desviación estándar | 0,35 | 0,52 |

Fuente: Autores.

Con relación a la desviación estándar, la dispersión es la mayor para el día 92 con 0,52, porque los datos tomados para su cálculo representan la dificultad de retención de materia vegetal en diferentes órdenes, ya sea porque el número de

nuevos especímenes en los que la masa vegetal se distribuye de los individuos iniciales del estudio son arrastrados por la corriente y el viento, o porque la mayor parte de las estructuras de estos se han deteriorado completamente.

Gráfica 2. Ganancia de Biomasa de *Eichhornia crassipes* para el grupo experimental durante los siete períodos de monitoreo entre el 25 de abril al 27 de julio del 2018.



Fuente: Autores.

En cuanto al grupo experimental, como se muestra en la Gráfica 2 y se refuerza con la información de la Tabla 4, los reactores 1 y 3 presentan entre los días 0 y 16 del experimento la fase inicial de acumulación de biomasa cuyo rango de ganancia de biomasa equivale a 0,04 gr x m² y 0,03 gr x m² respectivamente, expresando su acondicionamiento en el medio aislado en el cual se siembran, a comparación del reactor 2, que durante el mismo período muestra un marcado estado de pérdida de biomasa con un valor de -0,11 gr x m², que permite contrarrestar el estrés generado por su manipulación al adecuar los individuos de acuerdo a las especificaciones iniciales de peso y número de órganos, lo que se refleja en la pérdida de estructuras fotosintéticamente activas y raíces.

Tabla 5. Valores estimados de biomasa, parámetros de promedio y desviación estándar para los días 0 y 16 correspondiente al grupo experimental de *Eichhornia crassipes* durante el 25 de abril al 27 de julio del 2018.

| Reactor | Biomasa día 0 (gr x m ²) | Biomasa día 16 (gr x m ²) |
|---------|--------------------------------------|---------------------------------------|
| 1 | 0,10 | 0,14 |

| | | |
|---------------------|------|------|
| 2 | 0,24 | 0,13 |
| 3 | 0,17 | 0,20 |
| Promedio | 0,17 | 0,15 |
| Desviación estándar | 0,07 | 0,04 |

Fuente: Autores.

A nivel estadístico el promedio de la biomasa en los tres reactores para el día 0 equivale a 0,17 grxm² y para el día 16 con 0,15 grxm², cuyo periodo presenta una pérdida de biomasa la cual se refleja a partir de la desviación estándar, ya que la dispersión de datos en el día 16 es menor con 0,04 respecto al día 0 con 0,07.

En cuanto a la fase exponencial, a partir del día 16 los tres reactores presentan una etapa acelerada de ganancia de biomasa cuyo valor máximo se desarrolla hasta el día 31 con valores de 0,41 grxm² para el reactor 1, de 0,40 grxm² para el reactor 2 y 0,44 grxm² para el reactor 3, y cuyo rango de ganancia de biomasa con el valor del día 15 (ver Tabla 5), corresponde a 0,27 grxm² para los reactores 1 y 2, y 0,24 grxm² para el reactor 3.

El rápido incremento establecido dentro de este intervalo refleja que los especímenes evaluados se logran adaptar a la disponibilidad de nutrientes en las cámaras aisladas del flujo constante aportado por la corriente, y por la disponibilidad de espacio, radiación solar y competencia interespecífica e intraespecífica, ya que, al ser un medio confinado, se limita la interacción con otras especies.

Tabla 6. Valores estimados de biomasa, parámetros de promedio y desviación estándar para los días 16 y 31 correspondiente al grupo experimental de *Eichhornia crassipes* durante el 25 de abril al 27 de julio del 2018.

| Reactor | Biomasa día 16 (grxm ²) | Biomasa día 31 (grxm ²) |
|---------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| 1 | 0,14 | 0,41 |
| 2 | 0,13 | 0,40 |
| 3 | 0,20 | 0,44 |
| Promedio | 0,15 | 0,42 |
| Desviación estándar | 0,04 | 0,02 |

Fuente: Autores.

La estadística relacionada con el promedio establece que la producción de biomasa aumenta de 0,15 grxm² en el día 16 a 0,42 grxm² del día 31 lo cual refleja un rango de ganancia de 0,27 grxm² para el grupo experimental, con una desviación de estándar que presenta una menor dispersión en el día 31 con 0,02, comparada con 0,04 del día 16, lo cual demuestra una sincronización de la especie con relación a su acumulación de biomasa en el punto máximo.

Para finalizar, la fase de decaimiento en la acumulación de biomasa del grupo experimental se identifica a partir del día 31 hasta el día 92, reflejando la pérdida de acumulación de biomasa respecto al tiempo, tal como lo demuestra la disminución de los valores de este parámetro, ya que en promedio para el día 31 se registra un dato de 0,42 grxm², para el día 48 con 0,39 grxm², para el día 61 con 0,28 grxm², para el día 77 con 0,28 grxm² y para el día 92 con 0,24 grxm², esto por la pérdida de generación de estructuras vegetales por la limitación en la disponibilidad de nutrientes suministrados por el medio en el cual se desarrolla.

Pero presentándose en el reactor 1 un fenómeno de acumulación de 0,29 grxm² en el día 61 a 0,31 grxm² en el día 77, al igual que en el reactor 3 entre el día 77 con 0,24 grxm² al día 92 con 0,25 grxm² (Tabla 6), por razón a que estos especímenes pueden emplear los elementos disponibles a nivel atmosférico como SO₂, NO_x, O₃, CO₂ por medio del intercambio gaseoso o hidrosolubilidad por lluvia, permitiendo así abastecer temporalmente la demanda de macro y micronutrientes a nivel metabólico e incrementar su biomasa, al igual que la acción establecida por el desarrollo de nuevos especímenes de origen vegetativo.

Tabla 7. Valores estimados de biomasa, parámetros de promedio y desviación estándar para los días 31, 48, 61, 77 y 92 correspondiente al grupo experimental de *Eichhornia crassipes* durante el 25 de abril al 27 de julio del 2018.

| Reactor | Biomasa día 31 (grxm ²) | Biomasa día 48 (grxm ²) | Biomasa día 61 (grxm ²) | Biomasa día 77 (grxm ²) | Biomasa día 92 (grxm ²) |
|---------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| 1 | 0,41 | 0,40 | 0,29 | 0,31 | 0,21 |
| 2 | 0,40 | 0,37 | 0,31 | 0,30 | 0,25 |
| 3 | 0,44 | 0,40 | 0,25 | 0,24 | 0,25 |
| Promedio | 0,42 | 0,39 | 0,28 | 0,28 | 0,24 |
| Desviación estándar | 0,02 | 0,02 | 0,03 | 0,04 | 0,02 |

Fuente: Autores.

Respecto a la estadística asociada a esta última fase esta refleja una desviación estándar que en general presenta una baja dispersión de los datos asociados a la acumulación de biomasa, ya que el valor de 0,02 se presenta en la evaluación de este parámetro de los días 31, 48 y 92, seguido de un valor medio de 0,03 en el día 61 y el mayor con 0,04 en el día 77 lo cual refleja el decrecimiento de los individuos de retener biomasa, factor asociado con el estrés sufrido por el aislamiento.

Con relación a los datos estimados de biomasa para el nutrir el modelo logarítmico de Malthus y logístico de Verhulst, es necesario extraer los datos asociados con los días en que la acumulación de biomasa inicia y llega a su punto máxima de

acumulación en la fase de ganancia exponencial, tomando para esto las parejas de valores tiempo-biomasa correspondientes a los días 31 y 77 para el grupo de control y de los días 15 y 30 para el grupo experimental, cuyos valores en las Tablas 7 y 8.

Tabla 8. Biomasa seca de *Eichhornia crassipes* en los días 31 y 77 para el grupo de control, entre el 25 de abril al 27 de julio del 2018.

| Cuadrante | Tiempo (días) | Biomasa Seca (grxm ²) | Promedio (grxm ²) |
|-----------|---------------|-----------------------------------|-------------------------------|
| A | 31 | 0,39 | 0,36 |
| B | 31 | 0,34 | |
| C | 31 | 0,33 | |
| D | 31 | 0,39 | |
| A | 77 | 1,24 | 1,52 |
| B | 77 | 1,22 | |
| C | 77 | 1,91 | |
| D | 77 | 1,72 | |

Fuente: Autores.

Ahora bien, para realizar la comparación de los datos calculados de biomasa respecto a la última investigación ejecutada por Rodríguez en el 2003 en la zona de estudio, se hace necesario aclarar que el autor determina este parámetro a partir de la densidad obtenida a partir del peso húmedo total del número de especímenes por cada uno de los cuadrantes que oscilaban entre 44 a 54 individuos, a diferencia del presente estudio que obtuvo este parámetro tomando de referencia de un solo individuo en cada monitoreo. Para este caso, el análisis se efectúa tomando el peso húmedo en lugar de peso seco, identificando así el promedio de la ganancia de biomasa en los días 0, 31, 61 y 92, los cuales se presentan en la Tabla 8.

Tabla 9. Ganancia de Biomasa seca de *Eichhornia crassipes* durante los intervalos 16 y 31 del grupo experimental, entre el 25 de abril al 27 de julio del 2018.

| Tiempo (Días) | Biomasa Dársena (Kg/ m ²) Rodríguez (2003) | Biomasa Río Bogotá (Kg/ m ²) Presente estudio |
|---------------|--|---|
| 0 | 0,8 | 0,25 |
| 30-31 | 1,3 | 1,03 |
| 90-92 | 3,3 | 3,77 |

Fuente: Autores.

Como se puede observar en la Tabla 8, se entiende que para los días 0 y 30 la producción de biomasa es menor en un medio lotico (Río Bogotá) con referencia al

escenario lentic (Dársena) en el cual se desarrolla el estudio de Rodríguez dado principalmente a las condiciones ambientales y metodológicas mencionadas. Esta diferencia en biomasa responde a que la dársena al ser una estructura hidráulica resguardada artificialmente de la corriente del río, favorece la disponibilidad de nutrientes hacia los especímenes que en ella se establecen puesto que al presentar un bajo flujo de corriente se promueve la sedimentación de los nutrientes, lo cual favorece el desarrollo del sistema radicular de los individuos y con ello la facilidad de disposición de una fuente constante de suministro de elementos fundamentales en la generación de biomasa, adicional a esto se limita estilo de competencia dado a nivel intraespecífico y por depredación, sumado a la mayor disponibilidad de luz fotosintéticamente activa, limitación del arrastre por viento y caudal y mantenimiento de la estructura hidráulica para la operación de la planta de tratamiento.

Con relación al día 90 es evidente que el valor corresponde para el de biomasa en el Río Bogotá de 3,77 Kg/m² en comparación a los 3,3 Kg/m², es mayor debido a la incidencia del medio sobre las especies, por ejemplo la vulnerabilidad por depredación y enfermedades, radiación solar, y al espacio disponible ya que en el río se renueva constantemente con la fuerza de caudal y arrastre por viento en comparación con la dársena, ya que las especies se confinan en la estructura lo cual limita el espacio de desarrollo y la competencia interespecífica lo cual genera que la especie acumule en menor tiempo los nutrientes disponibles y necesarios para su crecimiento el cual se encuentra relacionado directamente con la acumulación de biomasa.

6.2 DENSIDAD

Para estimar la concentración del poblamiento en escala de abundancia de la *Eichhonia crassipes* por unidad de área, inicialmente se calcula la Densidad relativa (*DR*), la cual permite identificar la razón del incremento poblacional de acuerdo a la cantidad de especímenes encontrados por monitoreo en cada m², y cuyo valor se distribuye en el número de estaciones de muestreo definidos en cada grupo dentro del diseño experimental verdadero.

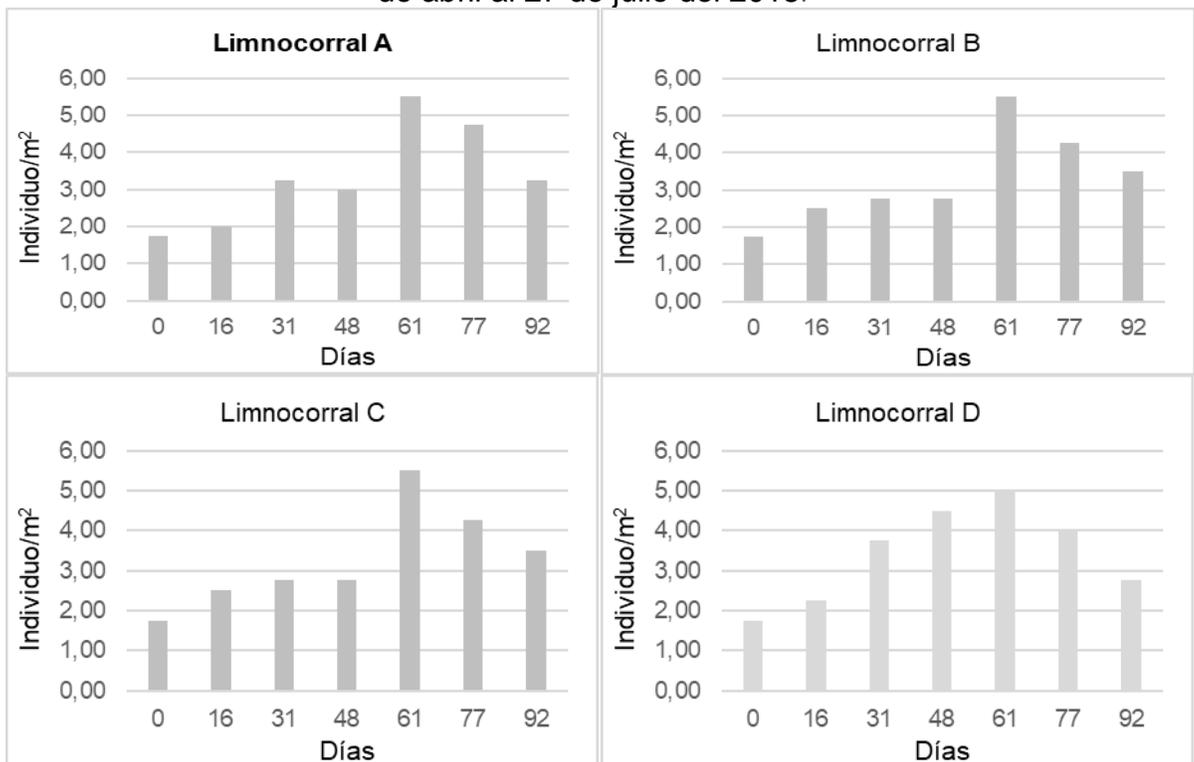
Para el caso del grupo de control, la *DR* respecto a los días 0 y 16 presenta una razón de poblamiento de 1,75 individuos/m², ya que se parte de un número inicial de 7 especímenes en cada limnocorral. A partir del día 16 hasta el día 77, el comportamiento gráfico de la *DR* es independiente para cada cuadrante, y no obedece a un crecimiento poblacional convencional excepto en el limnocorral D (crecimiento logarítmico) esto atribuido a la pérdida de algunos sujetos de origen vegetativo por causa de la elevación de los limnocorrales en ciertos puntos dado al

desarrollo de otras poblaciones de macrófitas que rodean las estructuras y así facilitando su evasión por el arrastre del viento y/o la corriente del río.

Ejemplo de ello es lo ocurrido con el limnocorral A entre los días 31 al 48, en el cual se tenía 13 individuos, pero a la segunda fecha disminuye a 12, el corral B entre los días 31 y 48 presenta 11 individuos para estos dos días de monitoreo y el limnocorral C entre los días 16 al 31, presenta un total de 13 individuos en la primera fecha y disminuyendo a 10 en la segunda (ver Gráfica 3)

Ahora bien, a partir del día 77, los cuatro limnocorrales presentan un descenso respecto a la cantidad de individuos, debido al deterioro morfológico y fisiológico de los especímenes iniciales, mientras que las generaciones que se logran desarrollar a partir de los nutrientes presentes en las cámaras alcanzan su madurez de reproducción vegetativa.

Gráfica 3. Estimación Densidad Relativa (DR) para el grupo de control entre el 25 de abril al 27 de julio del 2018.

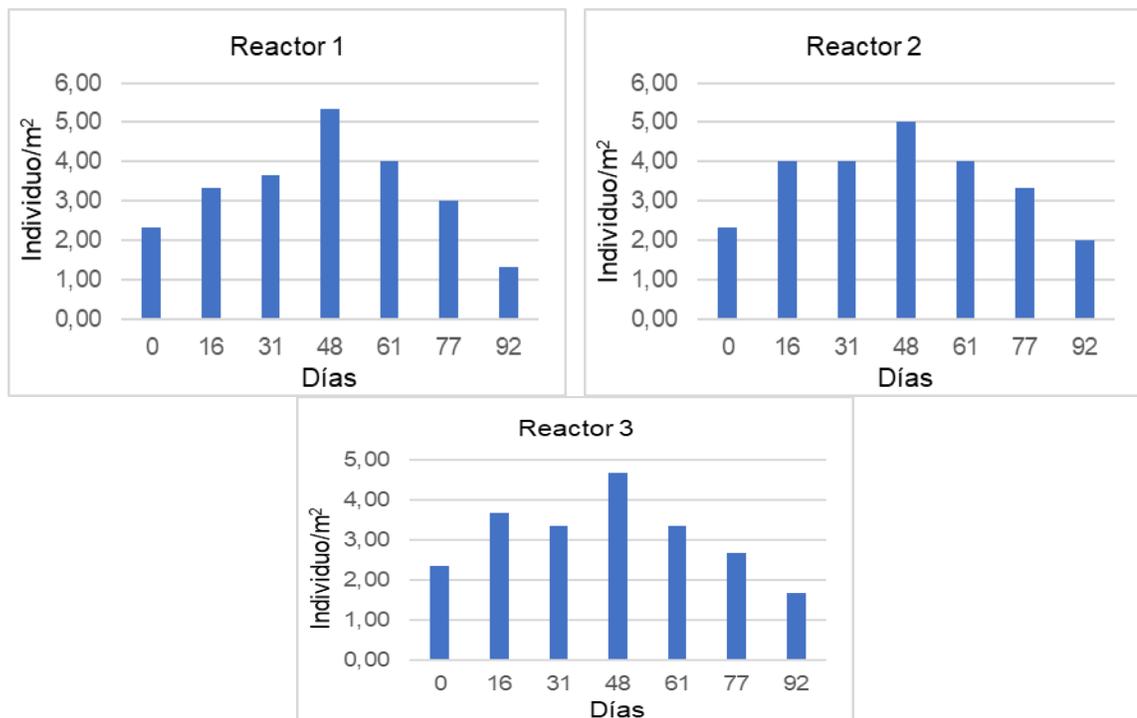


Fuente: Autores.

Con relación al grupo experimental se parte de una razón de poblamiento de 2,33 individuos/m² para las tres cámaras de desarrollo vegetal, cuyo crecimiento poblacional es gradual hasta el día 31 en el reactor 3, el cual presenta un deceso en la razón de 3,67 individuos/m² a 3,33 individuos/m².

En el día 48 las tres estaciones de muestreo presentan el pico más alto de razón poblacional, desgregados así; Reactor 1 con 5,33 individuos/m², Reactor 2 con 5,0 individuos/m², y el Reactor 3 con 4,67 individuos/m². A partir de este punto, la densidad relativa descende debido a la ausencia de nutrientes disponibles en el medio ocasionando que los especímenes no puedan desarrollar nuevas estructuras de carácter vegetativo.

Gráfica 4. Estimación de Densidad poblacional y Densidad Relativa (DR) para el grupo experimental entre el 25 de abril al 27 de julio del 2018.

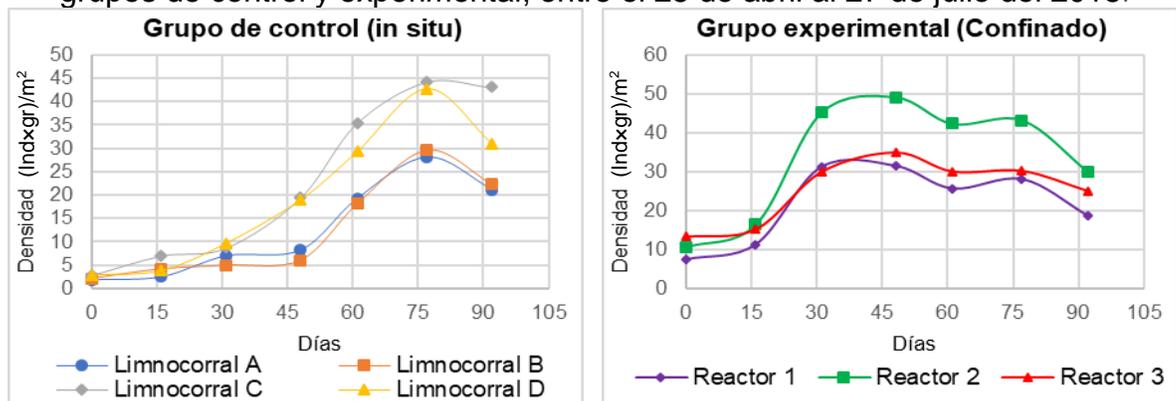


Fuente: Autores.

Ahora bien, cuando se relaciona la DR con el peso seco obtenido en cada monitoreo por grupo, se puede identificar la cantidad de nuevos especímenes de origen vegetativo disponible por ejemplar, como consecuencia de la ineficiencia de la *Eichhornia crassipes* de acumular la biomasa en un solo individuo; provocando así el aumento de la población de la macrófita.

El comportamiento de la densidad por parte del buchón en los dos grupos, es similar a la ganancia de biomasa ya que se presentan tres etapas o fases en la distribución gráfica de los datos estimados (Ver gráfica 5). Siendo la primera la representación de la fase de establecimiento inicial, en la cual el crecimiento de la población es relativamente lento, caso que se presenta en ambos grupos entre los días 0 y 16, la segunda corresponde a una fase de incremento poblacional cuyo valor superior de densidad refleja la capacidad de carga máxima propia de cada reactor, que se presenta en el día 77 para el grupo de control y en el día 48 para el grupo experimental. Finalmente, la tercera constituye la fase de pérdida, vinculada desde el día 77 al día 92 para el primer grupo y del día 48 al 92 para el segundo.

Gráfica 5. Estimación de la Densidad poblacional del Buchón de Agua para los grupos de control y experimental, entre el 25 de abril al 27 de julio del 2018.



Fuente: Autores.

Respecto al grupo de control, en la fase de establecimiento se presenta un rango de mayor propagación en la zona donde se encuentran individuos maduros caracterizados por un mayor porte y densidad, los cuales hacen parte de la porción más antigua de la colonia (limnocorrales C y D), en comparación con los especímenes dispuestos sobre la ribera de la misma. Sin embargo es evidente como se muestra en la curva de dispersión para las gráficas por limnocorral de la Gráfica 5, que en la sexta fecha de monitoreo es donde se refleja la mayor densidad (N) promedio por metro cuadrado de ocupación del buchón de agua en función de la acumulación equivalente a $36,13$ individuos \times gr/ m^2 , la cual presenta el segundo coeficiente de varianza más bajo después del intervalo 0 correspondiente al 23,5% de dispersión de los datos resultantes entre los limnocorrales. Esto se genera porque para la misma fecha la ganancia de biomasa establece su mayor pico de acumulación con un valor promedio de $1,52$ individuos \times gr/ m^2 , tanto por el aumento de los órganos de los especímenes estudiados como por la generación de nuevos individuos por reproducción vegetativa (clones por estolones).

Para el grupo experimental, la densidad también obedece a la capacidad de acumulación de biomasa incorporada en nuevos especímenes cuya proveniencia es a partir de los estolones, puesto que su capacidad de ganancia está en función de su facultad de generar nuevos clones, ya que es una especie con bajos índices de retención de biomasa por individuo. Como se muestra en las gráficas de la figura 14, tanto la densidad relativa como la densidad presentan su mayor pico en el día 48, con un coeficiente de varianza del 26,6 %.

Conviene destacar, que, sin importar el aislamiento por confinamiento de los especímenes evaluados en los tres reactores, su capacidad de propagación vegetativa es positiva entre los días 0 y 15 del monitoreo, en comparación a la acumulación de biomasa que se vio afectada por una fase de adaptación al medio. También es apreciable que en la fase de decrecimiento en las tres cámaras se produjo un bajo crecimiento poblacional entre los días 61 a 77 posiblemente por las facultades adaptativas de los individuos, ya que estaban haciendo uso de diferentes macro y micronutrientes disponibles a nivel atmosférico como lo son SO_x , NO_x , O_3 , CO_2 , Formaldehído, benceno, tolueno, etc., por medio del intercambio gaseoso a través de los estomas o a través de la raíz cuando el agente se disuelve en la lluvia. (Pedraza Ortiz, 2015)

Con relación a los datos necesarios para nutrir el modelo por cada unidad, se extrae la información de densidad inicial (N_0) la cual se presenta en la Tabla 9, datos que permiten identificar mediante el cálculo de su promedio, la densidad inicial de las respectivas unidades de muestro.

Adicional a esto, para integrarlo dentro del modelo logístico se hace necesario identificar la capacidad de carga (K), la cual depende directamente de la densidad, y se define para este caso bajo el criterio de López (1898) como “la máxima densidad por m^2 encontrado” (Ver Tabla 9). Siendo para el grupo de control 44,20 individuos \times gr/ m^2 y para el grupo experimental 16,35 individuos \times gr/ m^2 , ya que al estimar la capacidad de carga con la ecuación 8, los valores correspondientes no demuestran un valor representativo del comportamiento máximo de generación poblacional puesto que se obtiene para el grupo de control un valor de 0,61 gr/ m^2 y para el experimental de 0,25 gr/ m^2 .

Tabla 10. Capacidad de carga (K) para los grupos de control y experimental, durante el 25 de abril al 27 de julio del 2018.

| Grupo | Tiempo (día) | Máxima densidad en m^2 (individuos \times gr/ m^2) |
|--------------|--------------|--|
| Control | 77 | 44,20 |
| Experimental | 48 | 16,35 |

Fuente: Autores

Sin embargo, cuando se compara la capacidad de carga obtenida por Rodríguez (2003) equivalente a 42,41 Kg/m², respecto a los 28,57 Kg/m² determinados bajo el análisis de peso húmedo en esta investigación (Ver Anexos 16 y 17), la diferencia de 13,84 Kg/m² aparte de la escala espacial en la que se desarrolla cada experimento, se debe principalmente a que el autor hace la valoración de la capacidad de carga máxima partir del valor de densidad máxima obtenida de la sumatoria del peso húmedo total del número de individuos dados por cada uno de los cuadrantes.

6.3 MATERIA ORGÁNICA ABSORBIDA

Esta corresponde a la variable indirecta, la cual dentro de la investigación es monitoreada mediante la evaluación de DBO₅ y DQO, las cuales permiten identificar la cantidad de material orgánico que aprovecha el Buchón de Agua y los microorganismos asociados a sus raíces.

6.3.1 Demanda Biológica de Oxígeno (DBO₅):

Tabla 11. Promedio resultados obtenidos cálculo de variables en reactores, durante el 25 de abril al 27 de julio del 2018.

| Tiempo (días) | Biomasa (gr/m ²) | DBO ₅ (mg O ₂ / l) | DQO (mg O ₂ / l) |
|---------------|------------------------------|--|-----------------------------|
| 0 | 0,17 | 6 | 30 |
| 31 | 0,42 | 151 | 241 |
| 61 | 0,28 | 7 | 30 |
| 92 | 0,24 | 28 | 54 |

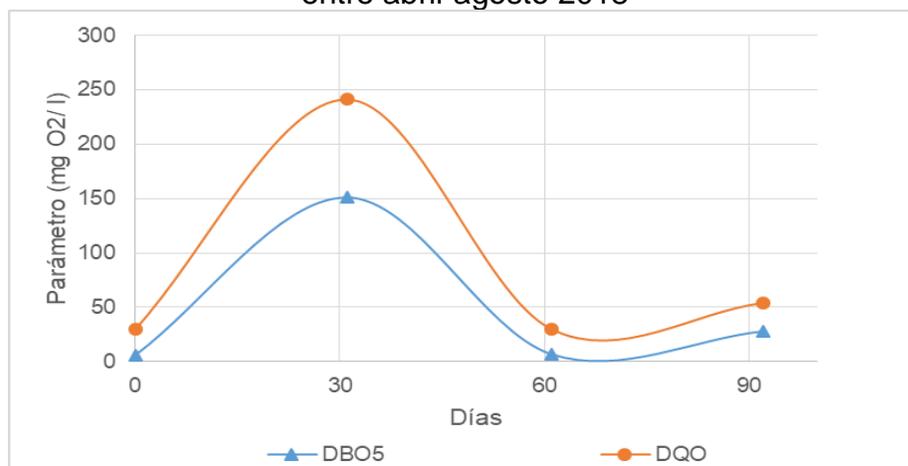
Fuente. Autores

A partir de los resultados obtenidos (Anexo 16) tras el análisis efectuado a cuatro muestras de agua tomadas del reactor 1 de manera mensual durante un período de cuatro meses comprendido entre abril- julio, se puede evidenciar el comportamiento de la DBO₅, (Ilustración 17) en la cual se percibe un incremento en el valor 151 mg O₂/ l (punto máximo en la gráfica) al segundo mes de muestreo, lo que bien puede relacionarse con el proceso de bioconcentración, el cual inicia con la filtración-adsorción de sólidos suspendidos. Este valor de DBO₅ al ser comparado con el máximo obtenido para el parámetro de biomasa presenta relación directa en la medida en la que en el segundo mes en el cual se alcanza el punto máximo referenciado de DBO₅ se obtiene el máximo valor biomasa, lo que

indica que en este momento se presenta un alto contenido orgánico que estimula el crecimiento de microorganismos que contribuyen a su descomposición, con ello, se da una mayor demanda de oxígeno, generando un cambio en la calidad del recurso hídrico.

De igual manera, al comparar el valor de DBO₅ máximo con el obtenido para el área foliar, en la misma fecha en la cual se reporta el primer valor (Tabla 10) se indica que este parámetro presenta correspondencia con el incremento de la DBO₅ puesto que constituye a su vez el valor máximo en el cual los individuos alcanzan una mayor capacidad fotosintética, permitiendo establecer la relación entre acumulación de biomasa y rendimiento de las macrófitas.

Gráfica 6. Curva DBO₅ y DQO, a partir de los resultados de análisis de laboratorio entre abril-agosto 2018



Fuente: Autores

Con respecto al decrecimiento en la DBO₅ dado entre el segundo y tercer mes de muestreo, se podría asociar la sedimentación evidente en los reactores, promovido este por el aumento de la resistencia al flujo ocasionado por las hojas y raíces de los individuos de la especie *Eichhornia crassipes* al interior de los reactores, al respecto es preciso indicar que esto puede constituir una premisa de gran relevancia en el objeto de estudio puesto que se debe considerar el sistema léntico característico del reactor 1. Otro de los aspectos que repercuten en el decrecimiento de la DBO₅ está relacionado con la evolución que va presentando el sistema haciendo especial referencia a la expansión y crecimiento de la población de buchón de agua presente, soportado por la presencia de raíces de mayor longitud, relacionando este hecho a que las raíces de las plantas dependen de factores tales como la calidad del agua, temperatura, y precipitación, brillo solar, entre otros. Comportamiento correspondiente a la producción foliar durante los

cuatro periodos en los que se efectuaron los muestreos validado mediante la determinación de la longitud a lo largo de la nervadura principal (Lh) y la anchura máxima perpendicular a la primera (Ah) (Cabezas Gutiérrez, Peña, Duarte, Colorado, & Lora, 2009), cuyos valores son evaluados mediante la ecuación de regresión lineal $y = a \times (bx)$ (Pitelli & Marchi, 2003), en la cual y representa el crecimiento del ancho de la hoja (Ah) en virtud de la variable x, que es el largo de la hoja (Lh).

Por otra parte, se puede suponer el estrés sufrido por la especie debido a la necrosis presentada por algunas hojas, estrés ocasionado por la fluctuación de las características propias del agua contenida en el reactor, además de asociar al caso, la influencia que puede presentar la baja relación N: P, teniendo en cuenta los referentes teóricos los cuales indican que la relación óptima para la especie *Eichhornia crassipes* es de 6:1, puesto que las plantas acuáticas necesitan en mayor cantidad nitrógeno (N) que fósforo (P), la anterior relación, aunque no fue estudiada en la presente investigación sustenta la situación que se reflejada durante las últimas fechas en las que se realizó la medición; la necrosis presentada en las hojas se extendió en ocasiones hasta el peciolo, resultando en ultimas en la pérdida de las partes o piezas del individuo (Ilustración 11, imagen costado izquierdo).

Es importante acotar que la anterior causa aplica al detrimento y muerte de los tejidos vegetales presentados en los individuos de los reactores, dado que los individuos dispuestos en los limnocorrales presentan un deterioro visualmente diferente, vinculado a la influencia negativa de organismos asociados a la planta, de manera tal que se evidenciaba rastros de mordiscos en las hojas que generaban la pérdida de la hoja (Ilustración 11, imagen costado derecho).

Ilustración 13. Evidencia necrosis en estructuras asociadas al Buchón de Agua, en unidad experimental y control respectivamente.



Fuente: Autores.

Aplicando la ecuación 13, correspondiente a la eficiencia de remoción, se establece el siguiente cálculo para el parámetro DBO_5 :

$$E = \frac{(28-6)}{28} \times 100 = 78,57 \%$$

(13).

El porcentaje de remoción obtenido en la ecuación 13, se encuentra entre el rango sugerido a partir de la literatura como el porcentaje de remoción de DBO_5 , específicamente para el buchón de agua, reportándose un rango del orden del 37 a 95 %.

6.3.2 Demanda Química De Oxígeno (DQO):

La Gráfica 6, presenta el comportamiento de la Demanda Química de Oxígeno (DQO), siendo este similar al expuesto para el análisis correspondiente a la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO_5), comportamiento que se puede asociar al proceso de absorción y precipitación, sin dejar de reconocer el papel que desempeña el intercambio iónico que se presenta de manera permanente dentro del sistema. Existe una relación directa entre los dos parámetros aun cuando en una muestra de agua hay más compuestos a ser oxidados por vía química que de manera biológica, lo anterior conlleva a que los valores de la DQO sean mayores a los de la DBO_5 .

Se podría atribuir la disminución en la DQO presentada entre el segundo y tercer muestreo, a la descomposición de materia orgánica causada por los microorganismos asociados al sistema radicular de los individuos de Buchón de Agua, lo cual se refleja en el parámetro de biomasa ya que coincide con el período donde se registra la fase de deceso, consignando también que el comportamiento presentando entre el primer y segundo muestreo realizado, corresponde a la adaptación de los individuos de la macrófita dispuestos en el reactor 1, por lo tanto, se puede interpretar como un medio con alto contenido de materia orgánica disuelta, lo que refleja un aumento en el valor de DQO. Adicionalmente, se hace alusión a la bioconversión y a su vez a la absorción de materia orgánica la cual inicia en la superficie de las raíces de las plantas, con ayuda de la temperatura del agua, como principal precursora del crecimiento de los individuos.

Al igual que el comportamiento registrado con la Demanda Biológica de Oxígeno, la DQO tiene una relación directamente proporcional con las variables

consideradas en la presente investigación, puesto que, los resultados obtenidos en los cuatro muestreos, responden a un incremento o disminución de acuerdo a las características propias de la DQO.

Aplicando la ecuación 14, correspondiente a la eficiencia de remoción, se establece el siguiente cálculo para el parámetro DQO:

$$E = \frac{(54 - 30)}{54} * 100 = 44,44 \%$$

Ecuación 14.

Para el caso de la Demanda Química de Oxígeno (DQO), la literatura reporta que aquellos sistemas que presentan la macrófita *Eichhornia crassipes*, tienen una eficiencia de remoción entre 72,6 a 90,2 % en lagunas de oxidación, pero en este caso corresponde a un 44,44 % debido a que no existe un aporte constante de elementos oxidantes que contribuyen a la degradación de materia orgánica total.

Ahora bien, es preciso indicar que existe una relación entre la DBO₅ y la DQO, teniendo en cuenta que esta segunda evalúa el oxígeno necesario para oxidar varios compuestos a través de la ruta química, estos se evalúan dentro de la Demanda Biológica de Oxígeno, de ahí la importancia también de considerar que cuando los desechos se caracterizan por el predominio de materia que puede ser química y no biológicamente oxidada, la DQO será mayor que la DBO. Al respecto es preciso señalar que esto implica una acción por parte de los microorganismos, los cuales metabolizan una parte de materia orgánica en forma de biomasa y consumen oxígeno para oxidar la parte restante.

La relación existente entre los dos parámetros permite establecer una aproximación de la biodegradabilidad del efluente en relación, permitiendo para el caso identificarla como la capacidad que presentan las sustancias y los materiales orgánicos para descomponerse en sustancias más simples por acción de la actividad enzimática promovida por microorganismos. Considerando lo anterior y teniendo en cuenta el promedio de los valores de DQO y DBO₅ obtenidos en el presente experimento se genera la siguiente relación en atención al supuesto de Hernández (1992), en el que se propone que:

$$(DQO/DBO_5) < 2,5 \quad \text{o} \quad 2,5 < (DQO/DBO_5) < 5$$

Se tiene que:

$$88,75 / 48 = 1,85$$

Valor que se encuentra dentro del rango que representa y caracteriza un efluente biodegradable.

6.4 VALIDACIÓN DE LOS MODELOS LOGARÍTMICO DE MALTHUS Y LOGÍSTICO DE VERHULST.

La validación de los modelos matemáticos logarítmico de Malthus y logístico de Verhulst se efectúa a partir de los datos extraídos en cada parámetro anteriormente descrito, con el propósito de establecer la relación de absorción de materia orgánica en función de los descriptores de *Eichhornia crassipes*.

Ahora bien, para comprender la dinámica del Buchón de Agua por medio de la representación de los modelos anteriormente anunciados, el análisis debe partir de la explicación de la ecuación general de tasa de crecimiento poblacional (ecuación 15).

$$\frac{dN}{dt} = r \times N \quad (15).$$

Esta ecuación representa cómo la tasa de crecimiento de la población en un intervalo definido (dN/dt) varía; siendo N el tamaño de la población y r la tasa de aumento per cápita (Tasa de Crecimiento Específico). La relación de la ecuación 15 con los modelos logarítmico y logístico se deriva del comportamiento dado por la tasa de aumento r , ya que si este no cambia aunque el tamaño de la población sea muy grande, se tiene un crecimiento exponencial; por el contrario si este término disminuye a medida que la población alcanza su límite máximo, entonces se presenta un crecimiento logístico. El crecimiento del individuo se entiende como la cantidad de especímenes que conforma la muestra poblacional.

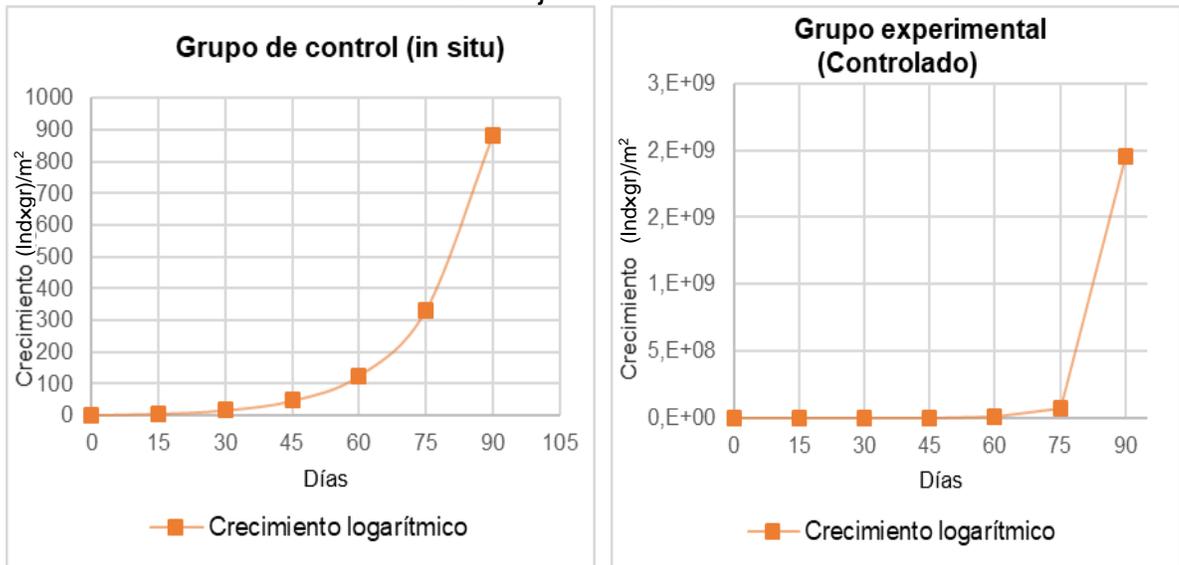
Al evaluar el modelo de Malthus en la investigación se identifica que tiene un comportamiento positivo y constante con relación a la cantidad de individuos que se añaden a la población a lo largo del tiempo, puesto que de acuerdo con la ecuación 15 si se parte de una densidad en función de la tasa de crecimiento (r) a lo largo del tiempo se da lugar a la siguiente expresión (ecuación 16).

$$\frac{dN}{dt} = N \times e^{rt} \quad (16)$$

De acuerdo a la modelación logarítmica el Buchón de Agua presenta una mayor tasa de crecimiento poblacional en el grupo experimental, ya que con una tasa de crecimiento de $0,224 \text{ día}^{-1}$ existe un crecimiento poblacional de 3,5

individuos \times gr/m², en contraste con el grupo de control, el cual presenta una tasa de crecimiento de 0,065 día⁻¹ en la cual se suman 2,6 individuos \times gr/m². Evidencia de esto es el desplazamiento gráfico que sufren cada uno de los datos estimados a partir de la ecuación, tal como se visualizan en la gráfica 7. (Ver anexos 12 y 13)

Gráfica 7. Modelo logarítmico para los grupos control y experimental durante los siete periodos de monitoreo del experimento, comprendido entre el 25 de abril al 27 de julio del 2018.



Fuente: Autores.

Como se evidencia en la Gráfica 7, existe una marcada diferencia entre los valores correspondientes a la razón de densidad inicial en los dos grupos, cuyo rango corresponde a 0,93 individuos \times gr/m². La justificación de la diferencia radica en la cantidad de estaciones de monitoreo sobre las cuales está valorado el parámetro de densidad, es decir que para el caso del grupo de control se hace una valoración respecto a 4 estaciones de monitoreo y para el caso del grupo experimental se consideran 3 reactores.

A partir de este modelo se evidencia la alta capacidad de ocupación que presenta la especie, puesto que, pese a que no cuenta con gran número de depredadores en las zonas que coloniza, puede ejercer su potencial ecológico mediante una explosión demográfica, siempre y cuando la disposición de nutrientes, espacio y buenas condiciones hidroclimáticas lo permitan. Aunque su alcance no es ideal para identificar la relación entre la capacidad de absorción de materia orgánica respecto a las ganancias de biomasa, este modelo permite identificar la rapidez de crecimiento de la población presente del Buchón de Agua en cualquier época del año, la cual corresponde a 0,065 día⁻¹ para el grupo de control y 0,224 día⁻¹ para el grupo experimental, asumiendo que la macrófita se instala en condiciones ideales respecto a depredadores, parásitos o fenómenos climáticos.

La diferencia entre la rapidez de crecimiento para los dos grupos, obedece principalmente a que los $0,224 \text{ día}^{-1}$ del grupo experimental refleja el acelerado crecimiento de la especie, con el fin de aprovechar rápidamente la disponibilidad de nutrientes que se encuentran en el cada reactor, presentándose competencia interespecífica, lo cual no ocurre con los especímenes del grupo de control cuyo valor equivale a $0,065 \text{ día}^{-1}$ puesto que este tipo de tensionante no genera gran estrés en esta unidad, pero se sustituye con otro tipo de interacción biológica como la depredación y/o competencia intraespecífica con otras macrófitas. Además, al comparar la rapidez de crecimiento de $0,080 \text{ día}^{-1}$ registrado en este estudio empleando los datos de peso húmedos *in situ* respecto a lo registrado por Rodríguez (2003) con un valor de $0,0187 \text{ día}^{-1}$, existe una considerable diferencia ya que el autor evalúa este término respecto a la densidad total dentro de su experimento, mas no por cada individuo como se realiza en el presente.

Ahora bien, dentro de la conformación del modelo logístico existe una etapa en la cual es posible identificar un comportamiento netamente logarítmico cuando el número de individuos no supera la disponibilidad de recursos con el que se sustenta, pero ya cuando la densidad poblacional es grande, los recursos empiezan a agotarse, lo cual desacelera el parámetro. A partir de esto, como se observa en la figura 20, el tamaño de la población se estabiliza, reflejando así la capacidad máxima de carga que soporta el sistema (K).

La modelación de este fenómeno es lo que se conoce como crecimiento logístico, el cual depende de la tasa de crecimiento (r), constante de crecimiento relativo (C) y la capacidad de carga (K), que al conjugarse conforman la siguiente ecuación:

$$\frac{dN}{dt} = \frac{K}{1 + e^{C-rt}}$$

(17).

Donde la relación $1 + e^{C-rt}$ se interpreta como la cantidad de individuos que se pueden sumar antes que se alcance la capacidad de carga del sistema dentro de 1 m^2 en el transcurso del experimento. Respecto a la fracción $K/1 + e^{C-rt}$ representa la capacidad de carga que no "se ha agotado" aún, sin embargo, mientras más se reduzca esta capacidad, mayor es la reducción que el termino $K/1 + e^{C-rt}$ tiene sobre la tasa de crecimiento.

Para que sea efectiva la validación matemática vinculada al crecimiento logístico, es necesario involucrar los valores correspondientes a los parámetros de biomasa

y densidad, de los cuales se extraen las parejas de datos necesarias para nutrir el modelo, partiendo inicialmente de los valores reportados en el día 0 en el parámetro de densidad y la información de la ganancia de biomasa correspondiente a los días 31 y 77 para el grupo de control y 15 y 31 para el grupo experimental, ya que corresponden al inicio y valor máximo estimado de la fase exponencial de producción de materia vegetal en ambos grupos, tal como se puede apreciar en la Tabla 11.

Partiendo de esto se logra estimar la constante de crecimiento relativo y la tasa de crecimiento específico a partir de las ecuaciones 10 y 11 respectivamente, y la capacidad de carga se determina adoptando la densidad máxima reportada en cada unidad, equivalente a 44,20 individuos×gr/m² para el grupo de control y 16,35 individuos×gr/m² para el grupo experimental.

Tabla 12. Parejas de datos de densidad y biomasa para la determinación de la capacidad de carga y la constante de crecimiento relativo.

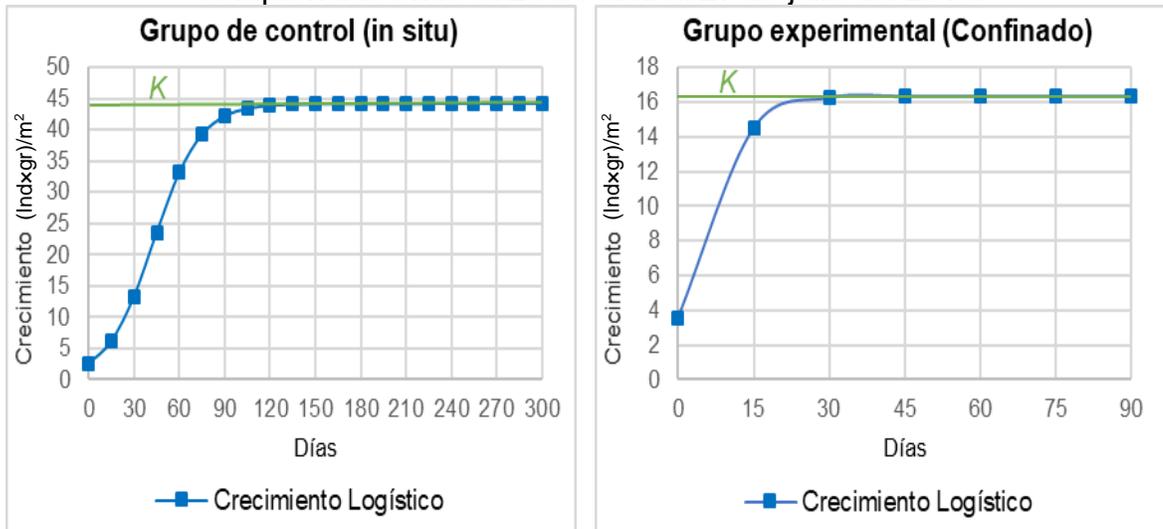
| Grupo | Tiempo (días) | Términos | |
|--------------|-----------------|---|---------------------------|
| | | Densidad (individuo×gr/m ²) | Biomasa gr×m ² |
| Control | t ₀ | 2,576 | -- |
| | t ₃₁ | -- | 0,364 |
| | t ₇₇ | -- | 1,523 |
| Experimental | t ₀ | 3,503 | -- |
| | t ₁₆ | -- | 0,154 |
| | t ₃₁ | -- | 0,415 |

Fuente: Autores

Como resultado de la validación del modelo logístico para las dos unidades se obtiene la Gráfica 8, en la cual se demuestra que a partir de los 165 días se supera la capacidad de carga equivalente a 44,20 individuos×gr/m² por parte del grupo de control, con una constante de crecimiento relativo de 2,78 y una tasa de crecimiento específico de 0,065 día⁻¹ (Anexo 10 y 12). Y para el grupo experimental superada a los 31 días con una capacidad de carga equivale a 16,35 individuos×gr/m², partiendo con una constante de crecimiento de 1,3 y una tasa de crecimiento específico de 0,224 día⁻¹ (Anexo 11 y 13).

Esto se debe a que los valores de ganancia de biomasa se iguala al de la capacidad de carga debido a que el término $K/1 + e^{C-rt}$ será aproximadamente (K/K), reflejado en la ecuación de crecimiento exponencial, dada la disponibilidad existente de recursos que permite solventar los requerimientos de los individuos en relación.

Gráfica 8. Representación del modelo logístico para los grupos de control y experimental, durante los siete períodos de monitoreo del experimento, comprendido entre el 25 de abril al 27 de julio del 2018.



Fuente: Autores.

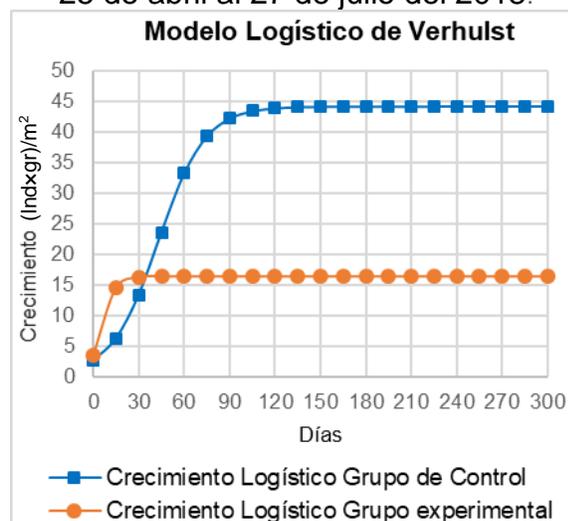
La evaluación de la información obtenida a partir de la validación del modelo logístico permite identificar que el comportamiento del crecimiento de la muestra de *Eichhornia crassipes* es diferente para cada uno de los grupos que conforman el diseño experimental en términos del desarrollo poblacional, de esta manera es posible identificar que la colmatación por crecimiento de la especie en el espejo de agua se alcanza en un tiempo más prolongado en un ambiente *in situ*, que la capacidad de carga del sistema se alcanza a los 165 días, en comparación con el grupo confinadas, ya que este factor se supera en el día 32. Las razones por las cuales se asume este comportamiento se debe a que los especímenes analizados se encuentran bajo diferentes condiciones de estrés, ya que el primer grupo se enfrenta a condiciones de asociadas a la competencia interespecífica e intraespecífica por espacio y oferta de luz fotosintéticamente activa además presentar una mayor oferta de nutrientes que promueven su reproducción, en comparación al segundo que no tiene un flujo constante de nutrientes por parte del caudal del Río Bogotá, lo cual genera una competencia interespecífica por los macro y micronutrientes que se encuentran disueltos en el medio y fundamentales para el crecimiento y desarrollo de los especímenes, lo cual repercute en la capacidad de producción de biomasa.

Ahora bien, al comparar los datos obtenidos y validados mediante el modelo logístico entre el grupo de control y el grupo experimental (ver Gráfica 9), es evidente que los valores correspondientes al primer grupo presentan una mayor

distribución respecto al desplazamiento de la curva sigmoidea, en comparación al segundo; debido a que los datos obtenidos *in situ* dentro del experimento son recolectados directamente en el sistema natural, lo cual refleja el comportamiento real tanto en acumulación de biomasa como también del desarrollo poblacional del Buchón de Agua en el Río Bogotá, lo cual implica un sin número de interacciones biológicas tanto intraespecíficas e interespecíficas.

Para el caso del grupo experimental, la baja escala en representación gráfica que involucra los datos obtenidos, muestra el efecto Allee que justifica este bajo crecimiento porque los individuos estudiados se encuentran limitados por la falta de competencia y de nutrientes por encontrarse en un sistema aislado.

Gráfica 9. Crecimiento logístico de los grupos de control y experimental, entre el 25 de abril al 27 de julio del 2018.

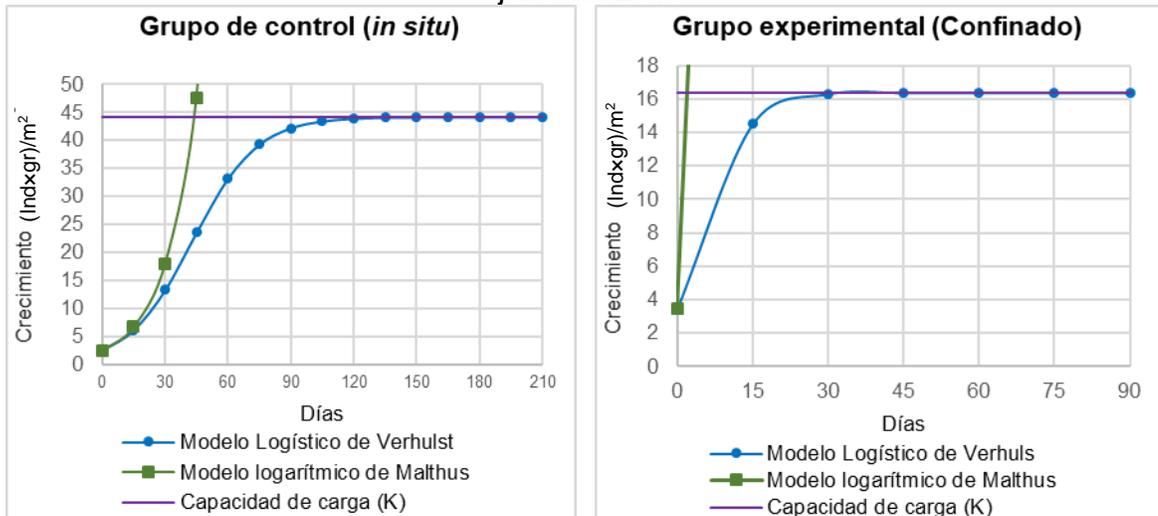


Fuente: Autores.

Por otra parte, al integrar los dos modelos en el mismo esquema, se logra identificar el factor de resistencia ambiental definida como la influencia de todos los factores del ambiente que evitan que la población crezca desmesuradamente, destacándose para el grupo de control la relación de una menor resistencia entre el área conformada por la curva logarítmica del modelo de Malthus, la sigmoidea del modelo logístico de Verhulst y la constante establecida como capacidad de carga, debido a que los especímenes tienen una fuente constante de nutrientes, competencia y protección de los individuos maduros respecto al ataque de diferentes depredadores, en comparación al grupo experimental, cuya área es más grande, debido a que las condiciones “controladas” o de confinamiento representan una mayor resistencia por motivo del limitado suministro de

nutrientes, movimiento por parte del cauce del río, e interacciones biológicas con especies maduras (Ver gráfica 10).

Gráfica 10. Resistencia de los grupos de control y experimental durante los siete períodos de monitoreo del experimento, comprendido entre el 25 de abril al 27 de julio del 2018

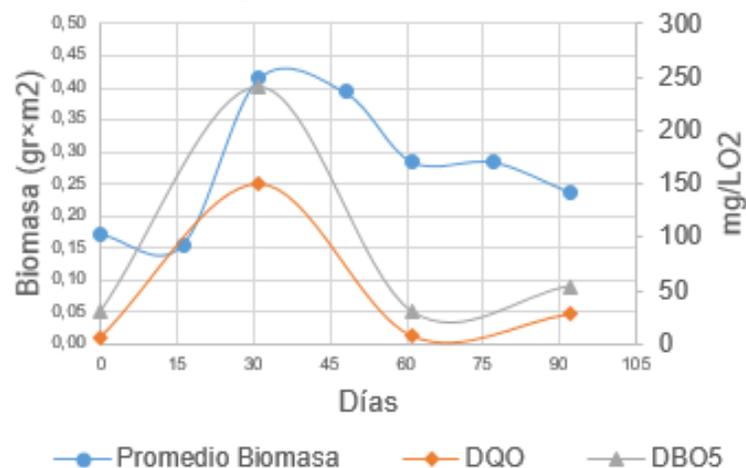


Fuente: Autores.

6.5 RELACIÓN GANANCIA DE BIOMASA VS MATERIA ORGÁNICA ABSORBIDA

A lo largo de la experimentación fue posible dilucidar la evolución en el crecimiento de las macrófitas, ligado a la valoración de la biomasa representada por el aumento de las dimensiones y peso de los especímenes tratados. En consecuencia, se presenta la Gráfica 11, en la cual se relacionan los valores promedio de las variables biomasa, DQO y DBO₅, para el grupo experimental.

Gráfica 11. Valores promedio de las variables biomasa, DQO y DBO₅ para el grupo experimental.



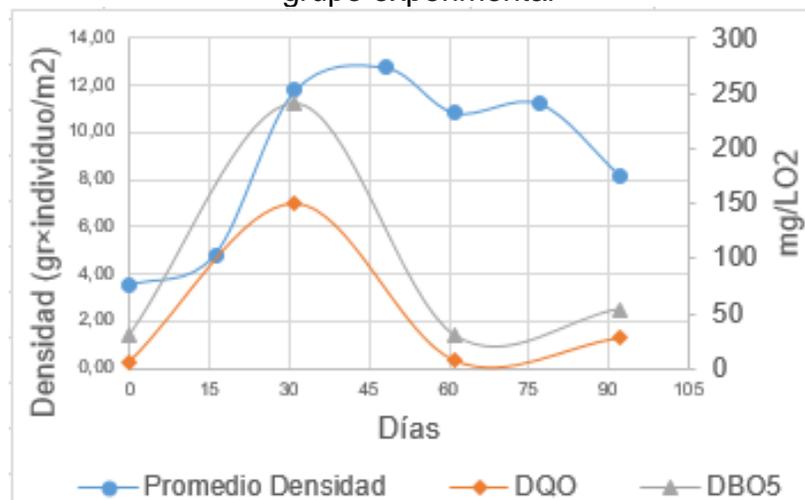
Fuente: Autores.

El comportamiento gráfico previsto en la Gráfica 11, establece que el día 32 de muestreo se registra el punto máximo de acumulación de biomasa con un valor promedio de 0,42 gr x m², que a su vez se confronta con el punto máximo de DQO cuyo valor es de 151 mg/ l O₂ y DBO₅ con 241 mg/ l O₂, siendo este último parámetro el que permite relacionar una mayor oferta de materia orgánica que faculta el desarrollo de microorganismos para dar lugar a la descomposición de la misma, es decir, en este punto se presenta el mayor aprovechamiento de materia dispuesta en el medio para ser removida por el Buchón de Agua. Dentro del modelo a nivel logístico esta fecha corresponde al punto de inflexión en el cual el crecimiento tiende a ser equivalente al valor de la capacidad de carga, correspondiente a 16,49 gr.

Respecto al período comprendido entre el día 30 al día 60, se puede visualizar que desde la fase de crecimiento relacionada con la biomasa dada a partir del valor de $0,28 \text{ gr}\cdot\text{m}^{-2}$ se sincroniza con el punto de caída o descenso en comparación con los valores de DQO cuyo valor corresponde a 7 mg/l O_2 y de DBO_5 con un valor de 30 mg/l O_2 . Comportamiento que representa la disminución de materia orgánica disponible en los reactores. Finalmente, la fase entendida entre los días 60 y 90 presenta un incremento sustancial en los parámetros de DQO con valor inicial de 7 mg/l O_2 , y final de 28 mg/l O_2 . Adicional, la DBO_5 presenta el valor inicial de 30 mg/l O_2 , y final de 54 mg/l O_2 . Lo mencionado producto del aporte de materia orgánica originario de la descomposición de los individuos evaluados y la liberación de sustancias orgánicas por parte de la planta, esta deducción se determina una vez se considera que el grupo experimental no contó con aporte de materia orgánica externa, ni de factores de intervención que pudiesen generar cambios dentro de la capacidad de absorción de materia orgánica.

En lo que respecta a los dos períodos anteriormente descritos, su desarrollo se vincula con la etapa de estabilización del modelo logístico en el cual se presentan fluctuaciones alrededor de la capacidad de carga.

Gráfica 92. Valores promedio de las variables densidad, DQO y DBO_5 para el grupo experimental



Fuente: Autores.

Por otra parte, se establece que la relación entre la variable densidad, respecto a la DQO y DBO_5 cuyos valores se nombraron anteriormente, presentando un comportamiento similar hasta el punto de inflexión en el cual se da un incremento

en la densidad referenciando un valor de 11,79 individuos×gr/m² hasta alcanzar el punto máximo de la misma variable con un valor de 12,80 individuos×gr/m².

Tramo que podría estar asociado al espacio en el cual la planta se encuentra aprovechando la materia orgánica ofertada hasta llegar a la cantidad máxima del poblamiento del cuadrante, lo que podría significar una limitación en la absorción de materia orgánica. La siguiente fase corresponde a los valores de DQO y DBO₅ más bajos, asociando un valor de densidad para este rango de la gráfica de 10,86 individuos×gr/m². Por último, la sincronización con la fase de pérdida de población relacionada con los parámetros de DQO y DBO₅ simulan que a medida que decae la población aumenta la cantidad de materia orgánica de origen macrófito.

Para el caso del montaje *in situ* fue más vistoso este comportamiento teniendo individuos que a los 16 días ya presentaban más de 3 estolones nuevos, lo que para las unidades experimentales fue un poco más lento, estas por su parte ampliaron el tamaño de sus hojas en particular que el desarrollo de nuevos estolones tan acelerado. Esto permite asociar la diferencia en la oferta de nutrientes dispuestos en cada uno de los medios, siendo un aspecto relevante para el crecimiento de microorganismos aerobios, quienes desempeñan un papel fundamental en la degradación de la materia orgánica y compuestos inorgánicos.

Además, se puede determinar el factor que relaciona la cantidad de materia orgánica absorbida por cada gramo de biomasa de Buchón de Agua, lo cual se ve representado en la tasa promedio de remoción de materia orgánica en el tiempo. Para esto se emplea la ecuación de estimación de la bioacumulación en Buchón de Agua relacionada por Benítez, Calero, Peña & Martín en la investigación titulada “Evaluación de la cinética de la acumulación de cromo en el Buchón de Agua (*Eichhornia crassipes*)”, evaluada para los cuatro periodos de monitoreo de DBO₅ que permiten identificar que por cada gramo de biomasa seca del buchón se acumula 2,41 mg de materia orgánica.

A continuación, se presentan los valores obtenidos para cada intervalo de monitoreo de DBO₅ en relación al peso seco. De acuerdo a los resultados obtenidos se identifica la correspondencia que existe entre el punto máximo de acumulación de biomasa respecto al valor de mayor absorción de materia orgánica, que sucede en el día 31 con una tasa de 2,41 mg/g buchón.

Tabla 13. Tasa promedio de remoción de materia orgánica para el Buchón de Agua para los días 31, 61 y 92.

| Concentración inicial (mg/l O²) | Concentración final (mg/l O²) | Tiempo exposición (días) | Tasa promedio de remoción (mg/g buchón) |
|---|---|---------------------------------|--|
| 30 | 241 | 31 | 2,41 |
| 241 | 30 | 61 | 1,62 |

| | | | |
|----|----|----|-------|
| 30 | 54 | 92 | 0,056 |
|----|----|----|-------|

Fuente: Autores.

7. CONCLUSIONES

Es posible identificar durante el análisis del proceso de crecimiento poblacional del Buchón de Agua que la variación en los datos estimados para la capacidad de carga depende de la escala espacial en la que se desarrolla cada experimento ya que *in situ* la dinámica del cauce del Río Bogotá influye en los procesos de acumulación de biomasa y consecuentemente con el poblamiento del Buchón de Agua en la superficie del sistema debido al arrastre y a la fluctuación en la concentración y volumen del flujo de nutrientes relacionado con las condiciones hidroclimáticas de la zona, coherente con el régimen de lluvias (IDEAM, 2018), en comparación con la el grupo confinado, el cual no presenta influencia de factores externos representativos que puedan incidir en el desarrollo poblacional.

Se ha identificado dentro del experimento que la especie presenta la mayor ganancia de biomasa al mismo tiempo que alcanza en punto máximo en la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO₅), relacionando la oferta de nutrientes que tiene la planta en este punto para su aprovechamiento. Sin embargo, al existir una reducción en el oxígeno disuelto se limita la actividad de los microorganismos asociados, reduciendo notablemente la absorción de materia orgánica.

Al validar los modelos logarítmico de Malthus y logístico de Verhulst se obtiene que el punto en el cual se alcanza la mayor cobertura del Buchón de agua en la superficie del Río Bogotá - sector El Espino ocurre en el día 165, tiempo a partir del cual existe un impacto de carácter negativo influyendo directamente en la calidad recurso hídrico que ingresa a la dársena. Por esta razón se recomienda realizar el retiro a partir del día 77 en virtud de la capacidad de absorción de materia orgánica una vez ha alcanzado su punto máximo de absorción de materia orgánica correspondiente a 2,41 mg/ g de Buchón de Agua. Siendo un aspecto relevante para motivar la eficiencia de la pre sedimentación en la dársena de la Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP) Tibitoc, considerando la reducción del contenido de materia orgánica propia del efluente en comparación con las características actuales que presenta el sistema, ya que permite reducir entre otros aspectos la turbidez del afluente que ingresa al sistema de pre tratamiento.

Al aislar a los individuos que se establecen como la muestra representativa de la población de *Eichhornia crassipes* en los grupos de control y experimental, se puede estimar su tendencia respecto a la abundancia y la producción de biomasa, ya que esta acción facilita su evaluación en diferentes etapas de crecimiento del Buchon de Agua en tiempo (0, 15, 30, 45, 60, 75 y 90 días). Al igual que la biomasa seca, su cálculo implica el peso seco por sub muestra, asociando la densidad en función directa con la Biomasa.

Una de las estructuras más importantes durante el proceso de absorción de materia orgánica, la constituyen las raíces de las macrófitas, las cuales desempeñan una de las funciones más esenciales durante el ciclo de nutrientes y la dinámica que se desarrolla en virtud de la suspensión del sistema radicular a lo largo de la columna de agua. Así mismo se hace bien considerarse que una de las principales causas que motiva la muerte de las especies vegetales acuáticas y con ello mayor aporte de materia dentro del sistema lo constituyen las fluctuaciones en el nivel de agua, situación no ajena a las condiciones características del Río Bogotá- sector el Espino.

Al realizar el comparativo de los datos de biomasa y densidad de los estudios ejecutados anteriormente en el área de influencia de la zona de estudio respecto a esta investigación, se puede concluir que el ambiente en el cual existe una mayor eficiencia en la remoción de materia orgánica obedece a un medio lotico como lo es el Río Bogotá, en el cual se debe tener en cuenta los tiempos de remoción de las poblaciones de Buchón de Agua asociadas.

8. RECOMENDACIONES

Al identificar la relación entre el valor máximo de acumulación de biomasa respecto a la acumulación máxima de materia orgánica por parte del grupo experimental en el día 31, y cuyo principio se puede aplicar para el grupo de control, se logra establecer una diferencia en ganancia de biomasa de acuerdo a la ubicación en la que se encuentren los especímenes dentro de la colonia; por lo tanto se recomienda a las autoridades competentes que se realice el retiro periódico de la porción madura o más antigua de la colonia, caracterizada por presentar individuos de mayor porte y aglomeración, sugiriéndose para el caso la remoción en el día 77 sin superar el día 165 ya que el sistema se vería colmatado por la especie. Por su parte se sugiere conservar aquellas colonias nuevas caracterizadas por el desarrollo de muy pocas estructuras; de manera particular se hace referencia a aquellos individuos compuestos por 3 a 6 hojas (parámetro sugerido por la literatura y adoptado para la selección de las especies empleadas desde el inicio de la experimentación).

Para facilitar y aumentar la efectividad de los retiros periódicos de *Eichhornia crassipes*, se pueden implementar estrategias de instalación de cuadrantes a lo largo de la ribera del río, lo cual permitiría controlar la densidad de la misma, a su vez que facilita la remoción del Buchón de Agua cuando deje de retener materia orgánica.

Para finalizar, en futuras investigaciones que involucren el uso de *Eichhornia crassipes* en una unidad *in situ*, se considere la relación existente entre el desarrollo morfológico y fisiológico representado por la Tasa de Crecimiento Relativa (RGR), lo cual permite aproximar al alcance real de la capacidad de absorción incluyendo la incidencia que presentan los factores atmosféricos en la eficiencia de la especie. Al igual se recomienda mediante un análisis diferencial evaluar el comportamiento de la población de Buchón de Agua, de acuerdo a la zona en la cual se desarrollan especímenes dentro de la colonia, ya que como se evidencia en esta investigación, existe un comportamiento diferencial en la acumulación de biomasa entre los especímenes que se ubican dentro y la zona limítrofe de la misma.

Al identificar la resistencia ambiental con relación a la especie tanto para el grupo de control, como el experimental, se puede evidenciar que, al evaluar la especie en condiciones controladas, el comportamiento de los especímenes representa una efectividad menor respecto al potencial real que presentan dentro del medio en que habitan.

9. TRABAJOS CITADOS

- Alonso Peña, J. R. (2011). Pecíolo. En M. d. hoja, *Manual de histología vegetal* (pág. 300). Madrid: Ediciones Mundi-Prensa.
- Cabezas Gutiérrez, M., Peña, F., Duarte, H. W., Colorado, J. F., & Lora Silva, R. (2009). Un Modelo Para La Estimación Del Área Foliar En Tres Especies Forestales De Forma No Destructiva. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica* 12 (1), 121-130.
- Camelo-Mendoza, L. M., Martínez-Peña, M. L., Ovalle-Serrano, H., & Jaimes, V. I. (2016). Conservación ex situ de la vegetación acuática de humedales de la sabana de Bogotá. *Revista Biota Colombiana, Volumen 17 Suplemento 1 - Humedales Julio*, 03-26.
- CAR. (2006). *Corporación Autónoma Regional De Cundinamarca Car*. Obtenido de Zonificación Ambiental Cuenca Río Bogotá: <https://www.car.gov.co/uploads/files/5ac23a34c892e.pdf>
- CAR. (19 de Julio de 2018). Predial Integrado DRSC, Plataforma Geoambiental. Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca CAR, Dirección Regional Sabana Centro (DRSC), Zipaquirá, Colombia.
- Cárdenas-López, D., Baptiste, M., & Castaño, N. (2017). *Plantas exóticas con alto potencial de invasión en Colombia*. Bogotá D.C. : Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. 295pp.
- Cardona, A., Abdelarrague, R., Peña Rodríguez, G., Marín, E., & Calderón, A. (2008). Aplicación de la técnica fotoacústica resuelta en tiempo al monitoreo de la fotosíntesis en plantas de lirio acuático (*Eichhornia crassipes*). *Revista Respuestas Año 13 ISSN 0122-820X*, 5-12. Obtenido de https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-inta_fyd_74_la-radiacion-solar-y-las-plantas.pdf
- Castro P, C. (2013). *Métodos Numéricos*. Obtenido de Facultad de Ingeniería de Minas, Geología y Civil, Departamento académico de ingeniería de minas y civil, : <https://cristiancastrop.files.wordpress.com/2010/09/catedra-metodos-numericos-2013-unsch-01.pdf>
- CEIBA. (2015). *Eichhornia crassipes (Mart.) Solms*. Obtenido de Catalogador de información Biológica - IAvH, Información Bioecológica De Flora Exótica Con Potencial Invasor En Colombia: http://i2d.humboldt.org.co/ceiba/resource.do?r=fichas_colombia_flora_invasora
- Cepeda, F. (1981). A propósito de los modelos sobre el Café en Colombia. *Revista Colombiana de Matemáticas*, 67-88.
- Coetzee, J. &. (2012). Biological and integrated control of water hyacinth: *Eichhornia crassipes*. *Proceedings of the Second Meeting of the Global Working Group for the Biological and Integrated Control of Water Hyacinth. Beijing, China, 9-12 October 2000*, 21-28.

- Cortés López, J. C., & et al. (1993). El modelo no lineal de crecimiento logístico: estudio y solución. Instituto Universitario de Matemática Multidisciplinar Universitat Politècnica de València. En M. C. Martínez Calvo, & A. Pérez de Vargas, *Métodos Matemáticos en Biología*. Madrid: Ed. Centro de Estudios Ramón Areces, S.A. Obtenido de <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/30891/modelo%20logistico.pdf>
- Cridle, R. S., Smith, B. N., & Hansen, L. D. (1997). Theory, A respiration based description of plant growth rate responses to temperature. *Planta*, 441–445.
- Damgaard, C. (2012). Estimating plant allometric relationships in a power model with a minimum size of allocation. *Ecological Informatics, Volume 8*, 65-67.
- Di Benedetto, A., & Tognetti, J. (2016). Acumulación de biomasa, Técnicas de análisis de crecimiento de plantas: su aplicación a cultivos intensivos. *RIA. Revista de investigaciones agropecuarias, RIA. Vol.42 no.3 Ciudad Autónoma de Buenos Aires dic.*
- Educatina. (03 de Julio de 2013). *Estimación de densidad poblacional (parte 1) - Ecología - Educatina Video You tobe*. Obtenido de Educatina : <https://www.youtube.com/watch?v=JbWWGJ8r5JY&t=154s>
- Escobar Moreno, J. E. (01 de Agosto de 2012). *Buchón de Agua*. Obtenido de Plantas acuáticas en los Humedales de Bogotá: <http://humedalesbogota.com/2012/08/01/plantas-acuaticas-en-los-humedales-de-bogota/>
- Funk, V. H. (2007). Checklist of the Plants of the Guiana Shield (Venezuela: Amazonas, Bolivar, Delta Amacuro; Guyana, Surinam, French Guiana). *Contributions from the United States National Herbarium*, 1-580.
- García Campos, M. L., & Hernández, E. (Abril - Mayo de 2014). *1.2 Unidades experimentales y variables*. Obtenido de Bioestadística: <https://sites.google.com/site/tallerdebioestadistica/estadistica-descriptiva/1-2-variable-aleatoria-variables-fijas-y-variables-de-respuesta>
- GetDrawings. (2018). *Water Hyacinth Drawing*. Obtenido de Water Hyacinth Drawing images for free to download, print or share.: <http://getdrawings.com/water-hyacinth-drawing>
- Gómez, L. (30 de Octubre de 2005). *Batalla del buchón en Tominé*. Obtenido de El Tiempo: <https://www.eltiempo.com/archivo/documento/MAM-1811530>
- Gutiérrez López, E. (1898). *Metodología, evaluaciones y resultados; Densidad*. Obtenido de Técnicas de evaluación del lirio acuático: densidad, Cobertura y Crecimiento. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua-SARH: http://repositorio.imta.mx/bitstream/handle/20.500.12013/814/IMTA_004.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Huete, D. (2017). El modelo estocástico de Gompertz. Modelización de datos sociodemográficos. *DAN*, 3-157.
- IDEAM. (04 de Junio de 2007). *Demanda Bioquímica de Oxígeno – 5 días, incubación y electrometría*. Obtenido de Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, Subdirección de hidrología - Grupo laboratorio de calidad ambiental: <http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/Demanda+Bioqu%C3%A>

Dmica+de+Ox%C3%ADgeno..pdf/ca6e1594-4217-4aa3-9627-d60e5c077dfa

- IDEAM. (28 de Diciembre de 2007). *Demanda química de oxígeno por refluo cerrado y volumetría*. Obtenido de Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, Subdirección de hidrología - Grupo laboratorio de calidad ambiental:
<http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/Demanda+Qu%C3%ADmica+de+Ox%C3%ADgeno..pdf/20030922-4f81-4e8f-841c-c124b9ab5adb>
- IGAC. (28 de Agosto de 2015). *Ribera*, Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Obtenido de Definciones, Resolución 1093 de 28 de agosto de 2015, Por medio de la cual se reglamenta el artículo 2.2.2.4.14 del Decreto 1170 de 2015 y se fijan los aspectos técnicos del trámite general de la diligencia de deslinde.:
http://www2.igac.gov.co/igac_web/normograma_files/resolucion%2010931.pdf
- IGAC. (28 de Agosto de 2015). *Río*, Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Obtenido de Definiciones, Resolución 1093 de 28 de agosto de 2015, Por medio de la cual se reglamenta el artículo 2.2.2.4.14 del Decreto 1170 de 2015 y se fijan los aspectos técnicos del trámite general de la diligencia de deslinde.:
http://www2.igac.gov.co/igac_web/normograma_files/resolucion%2010931.pdf
- INPN. (Agosto de 2018). *Eichhornia crassipes (Mart.) Solms, 1883, Taxonomy*. Obtenido de Inventaire National du Patrimoine Naturel:
https://inpn.mnhn.fr/espece/cd_nom/95829/tab/taxo
- Instituto Humboldt. (Agosto de 2018). *Gestión Territorial de la Biodiversidad*. Obtenido de <http://www.humboldt.org.co/es/#>
- Instituto Humboldt. (28 de Septiembre de 2017). *Las 35 plantas exóticas con alto potencial de invasión en Colombia*. Obtenido de <http://www.humboldt.org.co/es/boletines-y-comunicados/item/1108-35-plantas-exoticas-invasion-colombia>
- ISN. (2011). 4.4 *Tipos de muestras, muestras integradas*. *Manual de Instrucciones para la Toma, Preservación y Transporte de Muestras de Agua de Consumo Humano para Análisis de Laboratorio*. Obtenido de Programa de Vigilancia por Laboratorio de la Calidad de Agua para Consumo Humano, Subdirección Red Nacional de Laboratorios, Pág 35:
<https://www.ins.gov.co/sivicap/Documentacin%20SIVICAP/2011%20Manual%20toma%20de%20muestras%20agua.pdf>
- ISN. (2011). 4.5 *Recipientes para recoger las muestras*, *Manual de Instrucciones para la Toma, Preservación y Transporte de Muestras de Agua de Consumo Humano para Análisis de Laboratorio*, Pág 35. Obtenido de Instituto Nacional de Salud, Subdirección Red Nacional de Laboratorios. :
<https://www.ins.gov.co/sivicap/Documentacin%20SIVICAP/2011%20Manual%20toma%20de%20muestras%20agua.pdf>

- Kohli, R., Batish , D., & Singh, H. (2014). *Methods of Studying Communities, Population Ecology*. Obtenido de Centre for Environment and Vocational Studies, Panjab University, Chandigarh. Department of Botany, Panjab University, Chandigarh: <http://nsdl.niscair.res.in/jspui/bitstream/123456789/153/1/Population%20and%20community.pdf><http://nsdl.niscair.res.in/jspui/bitstream/123456789/153/1/Population%20and%20community.pdf>
- Londoño Carvajal , A., Giraldo Gómez, G. I., & Gutiérrez Gallego , Á. A. (2010). *Capítulo 6 Indicadores De Contaminación Por Materia Orgánica (Indicadores Bioquímicos)*. Obtenido de Métodos analíticos para la evaluación de la calidad fisicoquímica del agua, Facultad de ingeniería y arquitectura, Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales: <http://bdigital.unal.edu.co/49658/7/9789588280394.pdf>
- López Martínez, C. N., & Polo Campos, G. A. (2016). Analisis del sistema actual de abastecimiento de Bogotá. Agua Subterránea como fuente alterna o de contingencia. Bogotá D.C.: Universidad de la Salle, Facultad de Ingeniería.
- Minambiente. (Octubre de 25 de 2010). *Decreto 3930 de 2010, Artículo 2*. Obtenido de Ministerio de Ambiente, vivienda y desarrollo territorial: <http://www.minambiente.gov.co/index.php/normativa/decretos>
- Morello, J., & Oliver , S. (1981). *Ecología y subdesarrollo en América Latina. Siglo Veintiuno Eds. México D.F., México*. Obtenido de <https://www.mendoza-conicet.gob.ar/portal/enciclopedia/terminos/Biomasa.htm>
- Morlans , M. C. (2004). Densidad, Caracteres estructurales. En *Introducción A La Ecología De Poblaciones* (pág. 4). S.F. del V. de Catamarca: Editorial Científica Universitaria - Universidad Nacional de Catamarca ISSN: 1852-3013.
- Navarro Chávez, J. C. (2014). Diseño experimental verdadero. En *Epistemología y Metodología de la Investigación* (pág. 252). Ciudad de México : Grupo Editorial Patria.
- Orlandoni, G. (1997). Modelos de crecimiento de poblaciones biológicas:Un enfoque de dinámica de sistemas. *Economía*, 115-146.
- Pitelli , R., & Marchi, S. (2003). Estimativa da área foliar de plantas daninhas de ambiente aquático: *Eichhornia crassipes*. *Viçosa-MG, v.21. Edição Especial*, 109-112.
- Porras Pardo , C. N. (2017). *Estudio del buchón de agua (Eichornia crassipes) para el tratamiento de aguas residuales*. Bucaramanga: Universidad Abierta Y A Distancia UNAD.
- Porras Pardo , C. N. (2017). *Forma De Vida*. Obtenido de Estudio del buchón de agua (Eichornia crassipes) para el tratamiento de aguas residuales. Universidad Abierta Y A Distancia UNAD: <https://stadium.unad.edu.co/preview/UNAD.php?url=/bitstream/10596/17528/1/1098682038.pdf>
- Porro, R., Chacón León, M., & Rügñitz Tito, M. (2009). Parámetros estadísticos de selección. En R. Porro, M. Chacón León, & M. Rügñitz Tito, *Guía para la*

- determinación de carbono en pequeñas propiedades rurales. Manual Técnico 11* (pág. 61). Lima, Peru: World Agroforestry Centre (ICRAF).
- RAE. (2018). *Absorber tr. Biol.* Obtenido de Real Academia Española: <http://dle.rae.es/srv/search?m=30&w=absorbencia>
- RAE. (Agosto de 2018). *Biomasa.* Obtenido de Real Academia Española: <http://dle.rae.es/srv/search?m=30&w=biomasa>
- Ramón S, G. (2016). *Diseños experimentales.* Obtenido de Apuntes de clase del curso Seminario Investigativo VI: http://viref.udea.edu.co/contenido/menu_alterno/apuntes/ac37-diseno_experiment.pdf
- Revista Semana . (2017). *Bogotá: Renace el alma de la sabana.* Obtenido de Revista Semana Sostenible: <http://especiales.semana.com/ríos-de-colombia/bogota.html>
- Reyes Trujillo, Aldemar ; Ulises Barroso, Fabián ; Carvajal Escobar, Yesid ;. (2010). Clasificación de los cauces según su forma. En *Guía Básica para la caracterización morfométrica de cuencas hidrográficas* (págs. 60-61). Cali, Colombia: Colección Ciencias Físicas, Exactas y Naturales.
- Rial B., A. (2013). Plantas acuáticas: aspectos sobre su distribución geográfica, condición de maleza y usos, Ensayo. *Revista Biota Colombiana, Volumen 14 Número 2 Julio - Diciembre* , 79-91.
- Rivera Rueda, M. (21 de Marzo de 2018). La planta Tibitoc vuelve a manos del Acueducto de Bogotá. *El Espectador*, págs. <https://www.elespectador.com/noticias/bogota/la-planta-tibitoc-vuelve-manos-del-acueducto-de-bogota-articulo-745700>.
- Rodríguez Miranda , J. P., Gómez, E., Garavito, L., & López, F. (2010). Estudio de comparación del tratamiento de aguas residuales domésticas utilizando lentejas y buchón de agua en humedales artificiales. *Tecnología y Ciencias del Agua, antes Ingeniería hidráulica en México, vol. I, núm. 1, enero-marzo*, 59-68.
- Rodríguez Ospina, D. F. (Enero 2004 de 2003). *"Utilización de macrófitas acuáticas para la remoción de nutrientes y metales en agua destinada al consumo humano - Caso Planta de Tratamiento Tibioc"*. Obtenido de Universidad de los Andes, Tesis presentada como requisito para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil en el área de Ingeniería Ambiental: https://biblioteca.uniandes.edu.co/visor_de_tesis/web/?SessionID=L1Rlc2lzXzlwMDRfcHJpbWVyX3NlbWVzdHJlLzAwMDAyNDQ5LnBkZg%3D%3D
- Rodríguez Ospina, D. F. (2003). Utilización de macrófitas acuáticas para la remoción de nutrientes y metales en aguas destinadas al consumo humano - Caso Planta de Tratamiento de Tibitoc. *Universidad de Los Andes, Facultad de Ingeniería.*, 18.
- Rodríguez, N. (2013). *Modelación de la calidad del agua del río Bogotá en la Cuenca Alta incorporando incertidumbre Tramo Villapinzón- Tibitoc* . Bogotá D.C, Colombia : Universidad de Los Andes .

- Russo, R. O. (1983). Biomasa. En *Mediciones de Biomasa en sistemas agroforestales* (pág. 25). Cali: Programa Suizo de Cooperación para el Desarrollo.
- Salgado-Negret, B., & Paz, H. (2015). Protocolo para la medición de rasgos funcionales en plantas. En c. y. ecosistémicos., *La ecología funcional como aproximación al estudio, manejo y conservación de la biodiversidad: protocolos y aplicaciones*. (pág. 50). Bogotá, D.C.: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- San Miguel, G., & Gutiérrez Matín, F. (2015). Tipos de Biomasa según su naturaleza. En *Tecnologías para el uso y transformación de biomasa energética* (pág. 32). Universidad Politécnica de Madrid: Ediciones Mundi-Prensa.
- Sanjuán, M. (25 de Octubre de 2009). *Pierre-François Verhulst, Robert M. May y la aplicación logística*. Obtenido de Complejidad Exploraciones en la Ciencia de los Sistemas Complejos: <http://www.madrimasd.org/blogs/complejidad/2009/10/25/127532>
- Santos Castellanos , M., Segura Abril, M., & Núñez López, C. E. (2010). Análisis De Crecimiento Y Relación Fuente-Demanda De Cuatro Variedades De Papa (*Solanum Tuberosum* L.) En El Municipio De Zipaquirá (Cundinamarca, Colombia). *Rev. Fac. Nac. Agron. Medellín, Volumen 63, Número 1*, 5253-5266.
- Shuttleworth , M. (24 de Marzo de 2008). *Diseño Experimental Verdadero*., Obtenido de <https://explorable.com/es/disenio-experimental-verdadero>
- Shuttleworth , M. (2018). *Diseño Experimental Verdadero*. Obtenido de <https://explorable.com/es/disenio-experimental-verdadero>
- Standard Methods. (2005). 10400 Macrófitas, 10400 D. Estimados de Población, 1) Diseño Muestral. En I. A. American Public Health Association (APHA), *Standard methods for the examination of water and wastewater*. USA: American Public Health Association (APHA) , la American Water Works Association (AWWA) y la Water Environment Federation (WEF) .
- UBA. (22 de 03 de 2016). *Método areal o de parcelas, Métodos para la estimación de la abundancia*. Obtenido de Departamento de Ecología, Genética y Evolución. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires.: http://www.ege.fcen.uba.ar/wp-content/uploads/2014/05/Clase-22-03-2016_poblac.pdf
- Universidad Nacional de Colombia . (2009). *Modelación dinámica de la calidad del agua del río Bogotá* . Bogotá D.C .
- University of Central Florida. (2007). Verhulstt Model For Population Growth . Florida: Spring .
- Universidad de Sevilla. (16 de Septiembre de 2008). *Análisis de Datos en la Investigación Educativa / Bloque II*. Obtenido de Open course ware Universidad de Sevilla,page_23, from ocwus: http://ocwus.us.es/metodos-de-investigacion-y-diagnostico-en-educacion/analisis-de-datos-en-la-investigacion-educativa/Bloque_II/page_23.htm

- Universidad México Americana del Norte . (s.f). *Ensayo sobre el modelo del crecimiento exponencial, su uso en la dinámica de poblaciones y en la datación por el carbono* 14. Obtenido de http://lya.fciencias.unam.mx/gfgf/ode/ode_files/result5c.pdf
- V., O. (1989). *Biología y Ecología del Lirio Acuático. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua-SARH.*
- Valderrama Valderrama, L. T., Rivera-Rondón, C. A., & Gómez Rodríguez, A. M. (2016 de Agosto de 2016). *Comunidad de macrófitas*. Obtenido de Comunidades de macrófitas en ríos andinos: composición y relación con factores ambientales, *Acta biol. Colomb.*, Volumen 22, Número 1, p. 45-58, 2017. ISSN electrónico 1900-1649. ISSN impreso 0120-548X.: <https://revistas.unal.edu.co/index.php/actabiol/article/view/58478/60060>
- Vanegas, D. (2004). *Modelación matemática y evaluación del uso de macrófitas sobre la calidad del agua en la dársena de Tibitoc*. Obtenido de https://biblioteca.uniandes.edu.co/visor_de_tesis/web/?SessionID=L1Rlc2lzXzlwMDRfcHJpbWVyX3NlbWVzdHJlZAwMDAyNzQ0LnBkZg%3D%3D
- Villar, R., Ruiz-Robledo, J., Quero, J. L., & Otros. (2008). *Tasas de crecimiento en especies leñosas: aspectos funcionales e implicaciones ecológicas*. Obtenido de Capítulo 7,: <http://digital.csic.es/bitstream/10261/47933/1/Tasas%20de%20crecimiento%20en%20especies%20le%C3%B1osas.pdf>
- Yusti Muñoz, A. P. (2012). *Uso del buchón de agua (Eichhornia crassipes) por la comunidad aviar de dos humedales del valle geográfico del río Cauca, Colombia*. Obtenido de Universidad Del Valle, Facultad De Ciencias Naturales Y Exactas, Programa Académico De Biología, Santiago De Cali: <http://bibliotecadigital.univalle.edu.co/bitstream/10893/8442/1/CB-0461355.pdf>