

UCUENCA

Universidad de Cuenca

Facultad de Ciencias Agropecuarias

Carrera de Ingeniería Agronómica

Evaluación de especies vegetales nativas implementadas en un sistema de humedales artificiales de flujo vertical para el tratamiento aguas residuales domésticas

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Agrónomo


Autores:

Raúl Leonidas Bacuilima Aucapiña

Ernesto Javier Tasiguano Aucapiña

Director:

Jorge Alejandro García Zumalacarregui

ORCID:  0000-0002-0130-1230

Cuenca, Ecuador

2023-09-20

Resumen

En este estudio, se evaluó la capacidad de especies vegetales nativas para tratar aguas residuales en humedales artificiales de flujo vertical y se determinó su viabilidad como técnica de fitorremediación y su potencial agronómico. Se sembraron *Amaranthus spp.*, *Chenopodium quinoa* y *Canna indica* en humedales pilotos ubicados en la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) en Ucubamba, Cuenca, Ecuador. Utilizando un diseño de bloques al azar, se analizaron parámetros como altura, diámetro, área foliar, biomasa y longitud de raíces, así como los niveles de nutrientes (N, P, K, Ca, Mg, S, B, Zn, Cu, Fe y Mn) en el tejido vegetal. También se evaluaron las características del agua residual tratada, como pH, turbidez, sólidos disueltos totales, CE, oxígeno disuelto, carbono orgánico total, nitrógeno total, nitritos, nitratos, nitrógeno amoniacal, fósforo libre, fósforo total, DBO y DQO. Se realizaron pruebas estadísticas para analizar las diferencias entre las especies cultivadas en humedales con agua residual y agua potable. Los resultados indicaron diferencias significativas ($p < 0.05$) entre las especies en los humedales de agua residual y potable. También se observaron diferencias en la remoción de contaminantes y la absorción de nutrientes en las dos fases fenológicas. *Chenopodium quinoa* y *Canna indica* demostraron un mejor rendimiento en la remoción de contaminantes de las aguas residuales y una mayor adaptabilidad en los humedales estudiados en comparación con *Amaranthus spp.* Por lo tanto, se identificaron estas especies como altamente eficientes para ser implementadas en sistemas de tratamiento de aguas residuales y su aprovechamiento agronómico.

Palabras clave: amaranto, quinua, achira, fitorremediación, humedales artificiales



El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Cuenca ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por la propiedad intelectual y los derechos de autor.

Repositorio Institucional: <https://dspace.ucuenca.edu.ec/>

Abstract

In this study, the ability of native plant species to treat wastewater in vertical flow artificial wetlands was assessed, with a focus on determining their feasibility for phytoremediation and their agronomic potential. *Amaranthus spp.*, *Chenopodium quinoa*, and *Canna indica* were planted in pilot wetlands located at the wastewater treatment plant (WWTP) in Ucubamba, Cuenca, Ecuador. Employing a randomized block design, parameters such as height, diameter, leaf area, biomass, and root length were analyzed, along with nutrient levels (N, P, K, Ca, Mg, S, B, Zn, Cu, Fe, and Mn) in plant tissue. Additionally, characteristics of treated wastewater, including pH, turbidity, total dissolved solids, electrical conductivity (EC), dissolved oxygen, total organic carbon, total nitrogen, nitrites, nitrates, ammoniacal nitrogen, free phosphorus, total phosphorus, biochemical oxygen demand (BOD), and chemical oxygen demand (COD), were evaluated. Statistical tests were conducted to analyze differences between species cultivated in wastewater-fed wetlands and those fed with potable water. The results indicated significant differences ($p < 0.05$) between species in wastewater and potable water wetlands. Variations in contaminant removal and nutrient absorption were also observed during the two phenological phases. *Chenopodium quinoa* and *Canna indica* demonstrated superior performance in removing contaminants from wastewater and exhibited greater adaptability in the studied wetlands compared to *Amaranthus spp.* Consequently, these species were identified as highly efficient candidates for implementation in wastewater treatment systems and agricultural utilization.

Keywords: amaranth, quinoa, indian shot, phytoremediation, artificial wetlands



The content of this work corresponds to the right of expression of the authors and does not compromise the institutional thinking of the University of Cuenca, nor does it release its responsibility before third parties. The authors assume responsibility for the intellectual property and copyrights.

Institutional Repository: <https://dspace.ucuenca.edu.ec/>

Índice de contenido

1.	Objetivos e hipótesis	17
1.1.	Objetivo general	17
1.2.	Objetivos específicos	17
1.3.	Pregunta de Investigación	17
2.	Revisión bibliográfica	18
2.1.	Aguas Residuales	18
2.2.	Medida del contenido orgánico.....	19
2.3.	Materia inorgánica.....	20
2.4.	Características biológicas.....	20
2.5.	Humedales artificiales	20
2.6.	Humedal artificial de flujo superficial	21
2.7.	Humedal artificial de flujo subsuperficial.....	21
2.8.	Humedales de flujo vertical	21
2.9.	Fitorremediación.....	21
2.10.	Amaranto (<i>Amaranthus spp.</i>)	22
2.11.	Quinoa (<i>Chenopodium quinoa</i>)	22
2.12.	Achira (<i>Canna indica</i>).....	23
3.	Materiales y métodos	23
3.1.	Ubicación y descripción del área de estudio.....	23
3.1.1.	Delimitación del área de estudio.....	24
3.1.2.	Ubicación de los humedales artificiales	25
3.2.	Instalación de los humedales artificiales.....	26
3.2.1.	Adaptación de las tinajas para los humedales artificiales.....	26
3.2.2.	Ubicación del material filtrante.....	27
3.2.3.	Siembra de plantas.....	28
3.2.4.	Instalación de riego, caudal y drenajes.....	29
3.3.	Manejo del experimento	29
3.3.1.	Metodología para la investigación experimental del Objetivo 1	29
3.3.1.1.	<i>Amaranthus spp</i>	29
3.3.1.2.	<i>Chenopodium quinoa</i>	29
3.3.1.3.	<i>Canna indica</i>	30
3.3.1.4.	Parámetros analizados.....	30
3.3.1.5.	Análisis Estadístico	33
3.3.2.	Metodología para la investigación experimental del Objetivo 2.....	33
3.3.2.1.	Análisis vegetales.....	33
3.3.2.2.	Análisis de agua	33

3.3.2.3. Análisis Estadístico	35
3.3.3. Metodología para la investigación experimental del Objetivo 3.....	35
3.3.3.1. Análisis estadístico	35
4. Resultados y discusión	37
4.1. Caracterización del proceso de crecimiento del <i>Amaranthus spp.</i> , <i>Chenopodium quinoa</i> , y <i>Canna indica</i> cultivados en humedales construidos de flujo vertical para tratamiento de aguas residuales.....	38
4.1.1. Altura.....	38
4.1.1.1. <i>Amaranthus spp</i>	39
4.1.1.2. <i>Chenopodium quinoa</i>	41
4.1.1.3. <i>Canna indica</i>	42
4.1.2. Diámetro del tallo.....	43
4.1.2.1 <i>Amaranthus spp</i>	45
4.1.2.2. <i>Chenopodium quinoa</i>	45
4.1.2.4. <i>Canna indica</i>	46
4.1.3. Área Foliar (Lh, Ah)	46
4.1.3.1. <i>Amaranthus spp.</i>	48
4.1.3.2. <i>Chenopodium quinoa</i>	49
4.1.3.3. <i>Canna indica</i>	50
4.2. Determinación de la factibilidad del uso de humedales construidos como técnica de fitorremediación utilizando las especies vegetales nativas	51
4.2.1. Concentraciones de contaminantes en el efluente de los sistemas de estudio en las dos etapas, vegetativa y reproductiva	51
4.2.2. Análisis de conglomerados y similitudes de la dinámica de parámetros de calidad de agua residual en las tres especies vegetales en los HAFV	59
4.3. Comparación de la respuesta de las especies sembradas en los HAFV bajo condiciones específicas de alimentación/descanso.....	62
4.3.1. Longitud de raíces	63
4.3.2. Análisis de Peso seco, peso fresco y biomasa	66
4.3.3. Interrelación de las especies con la remoción de la DBO y DQO en las distintas fases vegetativas.....	69
Conclusiones	73
Recomendaciones	75
Referencias	76
Anexos	80

Índice de figuras

Figura 1: Área de instalación de los HAFV	26
Figura 2: Señalización del área de estudio	26
Figura 3: Esquema de la ubicación de los HAFV en el área de estudio	27
Figura 4: Ubicación de los HAFV en Campo.....	27
Figura 5: Tinas para ser usadas como HAFV	28
Figura 6: Acople interno con filtro de malla	28
Figura 7: Acople externo.....	28
Figura 8: Calibre de graba para el medio filtrante	29
Figura 9: Colocación del medio filtrante en los humedales	29
Figura 10: Siembra de plantas en los humedales artificiales.....	29
Figura 11: Mediciones las variables morfológicas de las plantas	33
Figura 12: Cálculo del área foliar, Image J.....	33
Figura 13: : Toma de muestras de agua de los HAFV con agua residual.....	34
Figura 14: Curva de la altura de las plantas entre los HAFV-AR y HAFV-AP.....	39
Figura 15: Comparación de medias entre HAFV-AR y HAFV-AP en la fase vegetativa (V4)	40
Figura 16: Comparación de medias entre HAFV-AR y HAFV-AP en la fase reproductiva (R6)	40
.....	40
Figura 17: <i>Amaranthus spp</i> en HAFV-AP	40
Figura 18: <i>Amaranthus spp</i> en HAFV-AR	40
Figura 21: <i>Canna indica</i> en HAFV-AR	43
Figura 22: <i>Canna indica</i> en HAFV-AP.....	43
Figura 23: Curva del diámetro de las plantas entre los HAFV-AR y HAFV-AP	44
Figura 25: Comparación de medias entre HAFV-AR y HAFV-AP en la fase reproductiva (R6)	45
.....	45
Figura 24: Comparación de medias entre HAFV-AR y HAFV-AP en la fase vegetativa (V4)	45
Figura 26: Curva del área foliar de <i>Amaranthus spp</i> . Entre el HAFV-AR y el HAFV-AP.....	47
Figura 27: Comparación de medias entre HAFV-AR y HAFV-AP en la fase vegetativa (V4)	49

Figura 28: Comparación de medias entre HAFV-AR y HAFV-AP en la fase reproductiva (R6)	49
Figura 29: Comparación de medias de los indicadores de contaminantes del agua entre F vegetativa y F reproductiva	57
Figura 30: <i>Chenopodium quinoa</i> con estrés hídrico en el período de descanso del HAFV	60
Figura 31: <i>Amaranthus spp</i> con estrés hídrico en el período de descanso del HAFV	60
Figura 32: <i>Canna indica</i> con estrés hídrico en el período de descanso del HAFV	60
Figura 33: Grupos de tratamientos diferenciados mediante el análisis de conglomerados a nivel de indicadores de agua residual	63
Figura 34 : Comparación de las medias de longitud de las raíces y prueba de Tukey	69
Figura 35: Peso fresco de las especies en HAFV con aguas residuales y sus testigos	71
Figura 36: Peso seco de las especies en HAFV con aguas residuales y sus testigos	71
Figura 37: Biomasa de las especies en HAFV con aguas residuales y sus testigos	72
Figura 38: Respuesta de las especies vegetales al DBO en aguas residuales	74
Figura 39: Respuesta de las especies vegetales al DQO en aguas residuales	75
Figura 40: Toma de muestras de agua de los HAFV con agua residual	84
Figura 41: Imagen escaneada de las hojas de <i>Canna indica</i> con el patrón métrico	84
Figura 42: Imagen escaneada de las hojas de <i>Amaranthus spp.</i> con el patrón métrico	84
Figura 43: Comparación de medias en la FR (R11) entre HAFV con agua residual y HAFV con agua potable en la fase eproductiva	84
Figura 44: Comparación de medias en la FV (V5) entre HAFV con agua residual y HAFV con agua potable en la fase reproductiva	84
Figura 45: Comparación de medias en el Estadío 2 entre HAFV con agua residual y HAFV con agua potable en la fase reproductiva	85
Figura 46 Comparación de medias en el Estadío 4 entre HAFV con agua residual y HAFV con agua potable en la fase reproductiva	85
Figura 47: Comparación de medias en la FR (R11) entre HAFV con agua residual y HAFV con agua potable	86

Figura 48: Comparación de medias en la FV (V5) entre HAFV con agua residual y HAFV con agua potable.....87

Figura 49: Comparación de medias en el Estadio4 entre HAFV con agua residual y HAFV con agua potable.....87

Figura 50: Comparación de medias en el Estadio 2 entre HAFV con agua residual y HAFV con agua potable.....88

Figura 51: Comparación de medias en la FR (R11) entre HAFV con agua residual y HAFV con agua potable.....88

Figura 52: Comparación de medias en la FV (V5) entre HAFV con agua residual y HAFV con agua potable.....89

Figura 53: Comparación de medias en el Estadio4 entre HAFV con agua residual y HAFV con agua potable.....89

Figura 54: : Comparación de medias en el Estadio 2 entre HAFV con agua residual y HAFV con agua potable.....90

Índice de tablas

Tabla 1: Comparación de las calorías y Proteínas del Amaranto con otros alimentos.....	26
Tabla 2: Parámetros analizados y la metodología	35
Tabla 3: Análisis de nutrientes en tejido vegetal	38
Tabla 4: Análisis de parámetros físico-químicos del agua en humedales artificiales.....	39
Tabla 5: Análisis de parámetros de crecimiento y desarrollo de plantas en humedales artificiales.....	41
Tabla 6: Análisis de Normalidad y Homogeneidad de Varianzas de altura, diámetro y área foliar.....	43
Tabla 7: ANOVA de la altura de <i>Amaranthus spp</i> en la fase vegetativa y reproductiva $p < 0,05$	45
Tabla 8: ANOVA de la altura de <i>Chenopodium quinoa</i> en la fase vegetativa y reproductiva $p < 0,05$	47
Tabla 9: ANOVA de la altura de <i>Canna indica</i> en la fase vegetativa y reproductiva $p < 0,05$	49
Tabla 10: ANOVA del diámetro de <i>Amaranthus spp</i> en la fase vegetativa y reproductiva $p < 0,05$	52
Tabla 11: ANOVA del diámetro de <i>Chenopodium quinoa</i> en la fase vegetativa y reproductiva $p < 0,05$	53
Tabla 12: ANOVA del diámetro de <i>Chenopodium quinoa</i> en la fase vegetativa y reproductiva $p < 0,05$	54
Tabla 13: ANOVA del área foliar de <i>Amaranthus spp</i> en la fase vegetativa y reproductiva $p < 0,05$	56
Tabla 14: ANOVA del área foliar de <i>Chenopodium quinoa</i> en la fase vegetativa y reproductiva $p < 0,05$	58
Tabla 15: ANOVA del área foliar de <i>Chenopodium quinoa</i> en la fase vegetativa y reproductiva $p < 0,05$	58
Tabla 16: Promedios de nutrientes en el tejido vegetal, Prueba de Tukey	64
Tabla 17: Autovalores del Análisis de Componentes Principales (PCA)	66

Tabla 18: Autovectores de Variables de Clasificación: Tratamiento en el Análisis de Componentes Principales (PCA)	67
Tabla 19: ANOVA ($p < 0,05$) de la longitud de las raíces en HAFV con agua residual y HAFV con agua potable	68
Tabla 20: ANOVA ($p < 0,05$) Peso fresco, Peso seco y Biomasa de las Especies Vegetales.....	70
Tabla 21: Comparación Peso fresco, Peso seco y Biomasa de las Especies Vegetales .	71
Tabla 22 Pruebas de normalidad y homocedasticidad de la respuesta de las especies vegetales ante la remoción de DBO y DQO.....	72
Tabla 23: ANOVA ($p < 0,05$) DBO y DQO de las especies vegetales	74
Tabla 24: Análisis de agua de los HAFV con agua residual en la etapa vegetativa	85
Tabla 25: Análisis de agua de los HAFV con agua residual en la etapa reproductiva	86
Tabla 26: Análisis de los nutrientes disponibles en los vegetales en la fase reproductiva de las especies vegetales.....	87

Abreviaturas y simbología

N: Nitrógeno

P: Fósforo

K: Potasio

Lh: Largo de la hoja

Ah: Ancho de la hoja

HAFV: Humedal artificial de flujo vertical

FV: Fase vegetativa

FR: Fase reproductiva

DBO: Demanda bioquímica de oxígeno

DQO: Demanda química de oxígeno.

HAFV-AR: Humedal artificial de flujo vertical alimentado con agua residual

HAFV-AP: Humedal artificial de flujo vertical alimentado con agua potable

Agradecimientos

Agradezco a Dios y todos los seres que me apoyaron y sobre todo sumaron fuerzas en este camino.

A mi madre Narcisa quien siempre nos apoyó para que logremos nuestros objetivos en la educación superior, siempre con las esperanzas que logremos las metas.

A mi hermano Javier por ser mi compañero durante mi formación académica y de titulación, con quien juntamos fuerzas para salir adelante.

A mi esposa Liseth mi compañera de vida quien ha compartido conmigo este caminar en la Agronomía con su paciencia y apoyo incondicional.

A nuestro tutor el Ing. Jorge Alejandro García Zumalacarregui, PhD, quien a nos apoyó con su conocimiento y sobre todo en cumplir los objetivos de titulación,

Al Dr. Giovanni Larriva director del laboratorio de suelos y aguas del campus Balzay, quien nos apoyó en los análisis de agua que fueron claves para nuestro proyecto de investigación.

A todos y cada uno de los miembros del tribunal Ing. Pedro Zea, M. Sc. Ing. Walter Larriva M.Sc. Ing. Patricio Castro PhD. quienes desde el principio pusieron un gran interés en nuestro proyecto de titulación y sobre todo nos apoyaron en las distintas etapas.

A la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad de Cuenca y a todos y cada uno de los docentes y personal administrativo, quienes me dieron una nueva oportunidad para terminar mi carrera universitaria, son grandes seres humanos que trabajan por el porvenir de la carrera y sobre todo por el bienestar del alumno para que este cumpla sus objetivos profesionales.

Raúl Leonidas Bacuilima Aucapiña.

En primer lugar, quiero agradecer a Dios por haberme permitido terminar esta etapa estudiantil con éxito, dándome la fortaleza para no rendirme, aunque el camino haya sido duro al final tiene su recompensa.

A mi mami Narcisa por haberme dado el regalo más grande que es la vida, por su lucha incansable, su ejemplo, sus consejos y su paciencia los mismos que fueron el combustible que me ha permitido llegar a este gran momento. A mi hermano Raúl con quien compartí aulas por su apoyo y sus conocimientos, por el día a día a lo largo de la carrera.

A mi tutor Dr. Jorge García, por compartir sus conocimientos en el tema y mas que todo el los ánimos para no decaer. Al tribunal conformado por el Ing. Pedro Zea, Ing. Walter Larriva y el Dr. Patricio Castro, por las recomendaciones y consejos que han permitido culminar con éxito esta tesis. Al Dr. Giovanni Larriva por su predisposición de ayudarnos con los análisis de laboratorio.

A todos los que estuvieron presentes en este paso por las aulas de la facultad de Ciencias Agropecuarias, como son docentes y amigos, que de una manera u otra fueron importantes haciendo que el volver día a día a la Universidad sea gratificante, en especial a Belén que estuvo ahí con ese apoyo incondicional.

A mis amigos Saul y Walter gracias por los consejos, aventuras y momentos que han compartido a lo largo de mi vida han sido el empuje para lograr esta y muchas metas más.

Ernesto Javier Tasiguano Aucapiña

Dedicatoria

A mi madre Narcisa quien siempre con su ejemplo de lucha nunca nos permitió rendirnos, siempre nos inculcó el conocimiento como una herramienta para la preparación a la vida, a mi hermano con quien compartimos éxitos y ante las adversidades supimos salir adelante con un apoyo mutuo, a mi esposa y mis suegros quienes como una gran familia nos brindaron la mejor de las energías y pusieron el hombro para lograr este objetivo, y también quiero dedicar a mi abuelita María (+) y mi tío Carlos (+) quienes desde la tierra espiritual me supieron brindar su bendición para no desfallecer y lograr la meta final.

RAÚL

A mi mamá y a mi hermano quienes han sido partícipes del esfuerzo que ha tomado llegar hasta aquí, en especial mi mamá, que con su bendición veía como paso a paso iba logrando terminar este trabajo de titulación. A mi abuelita María (+) por su cariño y su apoyo en vida. a mis amigos y docentes con quienes a lo largo de esta carrera compartí y adquirí conocimientos para la vida profesional. Gracias por esos consejos y confianza han permitido que este trabajo de tesis tenga éxito y por ese mismo motivo este logro va dedicado a Uds.

JAVIER

Introducción

El agua es uno de los recursos más importantes y por lo tanto tener acceso a agua de calidad, así como también al saneamiento de las aguas residuales constituye un derecho de la humanidad. Sin embargo, un tercio de la población del planeta no cuenta con acceso a este recurso tan importante para la supervivencia y al tratamiento de sus efluentes líquidos. Por esta razón, el tratamiento adecuado de las aguas residuales se convierte en un propósito fundamental para garantizar el bienestar de la población (UNESCO, 2019). En Latinoamérica, el tratamiento de aguas residuales es una problemática crítica, ya que solo el 26% de las aguas residuales reciben tratamiento adecuado, según la Organización Panamericana de la Salud (OPS). La Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) también destaca que el 80% de las aguas residuales se vierten directamente en cuerpos de agua sin tratamiento previo (Pazán y Gárate, 2022; Prashad, 2020).

El uso de humedales artificiales para el tratamiento localizado de aguas residuales es una opción técnica, científica y económica viable, que puede reducir patógenos y permitir el uso potencialmente útil y reciclable del efluente, incluyendo la irrigación de plantas cosechables. Esto puede ser especialmente beneficioso para pequeñas y medianas comunidades que no tienen acceso a plantas de tratamiento de aguas residuales mecanizadas, (Alarcón et al., 2018). En este contexto, el reúso de aguas residuales, los nutrientes contenidos en ellas pueden ser una fuente valiosa para la fertilización de los cultivos y ofrecen una alternativa rentable y sostenible en comparación con los costosos fertilizantes químicos. El uso de aguas residuales tratadas como fuente de nutrientes también puede ayudar a reducir la contaminación ambiental al disminuir la necesidad de aplicar fertilizantes químicos y toxicidad en el suelo. Sin embargo, es importante tomar precauciones para evitar efectos negativos en la fauna microbiana del suelo (Alarcón et al., 2018; Jaramillo y Restrepo, 2017). Las aguas residuales contienen altas concentraciones de macronutrientes como N, P y K, y micronutrientes como Na, Ca, S y B, que son suficientes para satisfacer las necesidades nutricionales de los cultivos agrícolas. Además, las plantas tienen el potencial de actuar como agentes de fitorremediación, lo que las convierte en una estrategia viable para la remoción de nutrientes (Magwaza et al., 2020). De esta manera, los agricultores pueden adoptar esta práctica rentable y sostenible para reducir los costos en fertilizantes y proteger el medio ambiente. Estos sistemas de cultivo pueden garantizar la seguridad alimentaria, teniendo fuentes de fertilización provenientes de humedales artificiales y crear procesos de remediación de agua al mismo tiempo; Caselles et al. (2018) reportó una alta producción de tomate (*Lycopersicon sculentum*) en un humedal de flujo subsuperficial teniendo 730 g. m⁻² y a su vez se eliminó la demanda biológica

UCUENCA

de oxígeno (5 días) (DBO_5), (DQO) mayor al 41% y las bacterias coliformes en un 46-81%. En estudios realizados en Estados Unidos se observaron altos rendimientos de maíz cultivados en un humedal artificial vertical ($10046 \text{ Kg. ha}^{-1}$) y a su vez no se encontraron efectos adversos en la fauna microbiana ni cambios en la composición nutricional de los granos de maíz con respecto a un cultivo convencional y esta actuó como especie fitorremediadora, (Alarcón et al, 2018).

De esta manera la Fitorremediación contempla un conjunto de especies capaces de realizar funciones de depuración de aguas residuales o contaminadas siguiendo esta línea de especies estudios determinan que el Amaranto es capaz de desarrollar esta función, debido a que puede acumular metales pesados presentes en aguas residuales domésticas e industriales (Nathan et al., 2012), además de ser una planta resistente a climas extremos y con un alto valor nutricional, lo que la convierte en un cultivo con potencial desarrollo en regiones andinas y costeras (Luis et al., 2018). Por otro lado, la Quinoa, especie originaria de los Andes de un alto valor nutritivo, capaz de ser manufacturada en harinas es utilizada en procesos de fitorremediación en suelos degradados por intervención antropogénica (Amjad et al., 2021). La Achira, por su parte, es una planta adaptable a humedales artificiales, tolerante a las aguas residuales y con capacidad de remoción de contaminantes (Vásquez, 2017), además de tener usos gastronómicos y ornamentales (Siavichay, 2019).

Toda la información anteriormente expuesta, justifica el uso, potencialización e implementación de humedales artificiales de flujo vertical con estas especies nativas como agentes fitorremediadores puede ser una alternativa viable y económica en el tratamiento de aguas residuales, ya que se reduce el uso de recursos naturales y se obtiene un beneficio agroindustrial con las especies depuradoras (Zambrano y Solorzano, 2019).

El presente estudio evalúa la respuesta de estas especies nativas como son el Amaranto o Sangorache (*Amaranthus spp.*), Quinoa (*Chenopodium quinoa*) y Achira (*Canna indica*) cultivadas en humedales artificiales de flujo vertical, su eficacia en el tratamiento de aguas residuales generadas en actividades domésticas y su potencial agronómico.

1. Objetivos e hipótesis

1.1. Objetivo general

Evaluar especies vegetales nativas como opción a implementar en humedales artificiales construidos de flujo vertical, primera etapa sistema francés, utilizados para el tratamiento aguas residuales.

1.2. Objetivos específicos

- Caracterizar el proceso de crecimiento del *Amaranthus spp.*, *Chenopodium quinoa*, y *Canna indica* cultivados en humedales construidos de flujo vertical para tratamiento de aguas residuales.
- Determinar la factibilidad del uso de humedales construidos como técnica de fitorremediación utilizando las especies vegetales nativas.
- Comparar la respuesta de las especies analizadas bajo el sistema de humedales artificiales de flujo vertical.

1.3. Pregunta de Investigación

El uso de las especies vegetales nativas cumple con los requerimientos de fitorremediación necesarios en el tratamiento de aguas residuales y brinda la posibilidad de una explotación económica

2. Revisión bibliográfica

2.1. Aguas Residuales

Las aguas residuales son aquellas que contienen una variedad de compuestos y elementos provenientes de la actividad humana y se contaminan debido a los distintos usos a los que se les destina (Díaz et al., 2012). Sin embargo, estas aguas son un recurso importante que debería ser aprovechado, especialmente en el campo de la agricultura para su uso como agua de riego. Considerando que el agua dulce del mundo es un recurso limitado y valioso, es esencial aprender a utilizarla de manera eficiente (Ansari et al., 2018). Las aguas residuales pueden clasificarse en domésticas, industriales, infiltraciones, conexiones incontroladas y agua pluvial. La mayoría de estas aguas contienen residuos que son fuentes de contaminación, por lo que se requiere un tratamiento adecuado (Novoa y Carvajal, 2015). Las aguas residuales domésticas son particularmente relevantes en la vida cotidiana.

2.1.1. Aguas residuales domésticas

Las aguas residuales domésticas se refieren específicamente a las utilizadas para la higiene diaria, como las de la cocina, lavandería y baño. Estas aguas, al igual que las provenientes de los centros comerciales, se caracterizan por contener principalmente agua (99.9%) y una pequeña cantidad de residuos sólidos (0.1%), lo que dificulta su tratamiento (Díaz et al., 2012). Por lo tanto, es importante tener en cuenta los componentes presentes en ellas.

2.1.2. Componentes de las aguas residuales

Caracterizadas por su composición física, química y biológica.

Características físicas

Temperatura.- la temperatura en el agua es un factor muy importante para la vida acuática, está directamente relacionada con la velocidad de las reacciones químicas que se dan en el medio, un aumento excesivo puede causar la muerte de los microorganismos benéficos (Muñoz, 2008).

Color.- El agua residual que es recientemente vertida lleva un color gris, pero con el paso del tiempo las bacterias descomponen los compuestos orgánicos pasa a ser de un color negro (Muñoz, 2008).

Olor.- Viene dado por la descomposición de la materia orgánica, las aguas negras se caracterizan por tener olor a sulfuro de hidrogeno producido cuando los microorganismos anaerobios han reducido los sulfatos a sulfitos (Muñoz, 2008).

Características químicas

Materia orgánica.- La materia orgánica está constituida por la combinación de carbono, hidrogeno, nitrógeno y oxígeno. Entre las sustancias que encontramos en el agua

residual son proteínas (40-60%), carbohidratos (25-50%) y aceites o grasas (10%) (Muñoz, 2008).

2.2. Medida del contenido orgánico

Para poder medir el contenido orgánico en aguas residuales se tiene los siguientes ensayos. La Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) es el parámetro más comúnmente utilizado para medir la calidad del agua residual. Este parámetro mide la cantidad de oxígeno disuelto que es utilizado por microorganismos para reducir bioquímicamente la materia orgánica presente en el agua. La DBO es una herramienta útil para determinar la cantidad de oxígeno necesario para estabilizar la materia orgánica a través de procesos biológicos.

Demanda química de oxígeno (DQO): Este parámetro se refiere a la medida de la cantidad de materia orgánica presente en el agua tratada por el humedal artificial. Los humedales artificiales son sistemas de tratamiento de aguas residuales que utilizan plantas y microorganismos para eliminar contaminantes y mejorar la calidad del agua. En este contexto, la DQO se utiliza como una herramienta para medir la eficiencia de los procesos de eliminación de la materia orgánica en el humedal artificial. La DQO es un parámetro importante en la evaluación del rendimiento de los humedales artificiales, ya que indica la cantidad de materia orgánica que se ha eliminado durante el tratamiento del agua y se expresa en mg/L de oxígeno. La reducción de la DQO es un indicador de que el humedal artificial está funcionando correctamente y eliminando eficazmente los contaminantes del agua (Raffo y Ruiz , 2014).

Carbono orgánico total (COT): En aguas residuales es un parámetro que mide la cantidad total de carbono orgánico presente en una muestra de agua residual. El carbono orgánico se refiere a la cantidad de compuestos que contienen carbono y que se originan a partir de materia orgánica, como por ejemplo restos de alimentos, desechos de plantas y animales, entre otros. El COT se mide en el laboratorio y se expresa en mg. L-1 de carbono. El COT es un indicador importante en la evaluación de la calidad del agua residual, ya que puede ser utilizado para determinar la carga orgánica en el agua y para evaluar la eficacia de los procesos de tratamiento. La reducción del COT durante el tratamiento de aguas residuales indica que se está eliminando materia orgánica del agua y que el proceso de tratamiento está funcionando correctamente (Aguilar et al., 2017).

2.3. Materia inorgánica

Los componentes que podemos encontrar en aguas residuales son:

- pH: se trata de la concentración del ion hidrogeno del medio es muy importante para la vida acuática en los niveles adecuados.
- Cloruros: son el resultado de la disolución de suelo o rocas que entran en contacto con el agua.
- Alcalinidad: es la presencia de hidróxidos, carbonatos y bicarbonatos en el agua residual.
- Nitrógeno: en aguas residuales la encontramos en forma de urea y materia proteica, cambia a amoníaco por descomposición gracias a bacterias, es de importancia para especies vegetales para su crecimiento en el medio.
- Fosforo: es esencial al igual que el nitrógeno para el desarrollo de especies vegetales en el medio, se os puede encontrar como ortofosfatos, polifosfatos y fosfatos orgánicos.

2.4. Características biológicas.

Microorganismos: tenemos la presencia de protistas plantas y animales, en los protistas tenemos bacterias, hongos, protozoarios, virus y algas (Nascimento *et al.*, 2018).

2.5. Humedales artificiales.

De acuerdo con Durán (2018), los humedales artificiales se definen como áreas que se caracterizan por tener un suelo completamente saturado de agua, junto con una parte viva compuesta por animales o plantas adaptados a este medio. Este medio ambiente presenta tres componentes principales:

- Presencia de agua: que puede estar inundada permanentemente o por periodos de tiempo, a una profundidad menor a un metro.
- Suelos característicos: se refieren a suelos aptos para retener una gran cantidad de agua, conocidos como suelos hídricos.
- Vegetación: compuesta por plantas macrofitas que se adaptan al medio en el que son cultivadas.

En cuanto al tratamiento de aguas residuales, existen dos tipos de humedales: el humedal artificial de flujo superficial y el humedal artificial de flujo subsuperficial (Durán, 2018).

2.6. Humedal artificial de flujo superficial.

Los humedales artificiales de flujo superficial se consideran canales en los que el agua está expuesta y en el fondo encontramos suelo impermeable el nivel de agua no es muy profundo y varía entre los 0.1 y 0.6 metros, por el tipo de vegetación podemos tener dos variantes de este sistema.

- Sistemas con macrofitas flotantes: como su nombre nos indica las plantas las plantas se encuentran flotando y sus raíces se desarrollan muy bien en el medio.
- Sistemas con macrofitas sumergidas: las especies vegetales de este sistema se encuentran sumergidas totalmente, este tipo de vegetación crece muy bien en aguas con oxígeno disuelto, por esta misma razón no se utiliza para el tratamiento de aguas con gran contenido de materia orgánica biodegradable ya que su descomposición provocaría condiciones anoxias (Delgadillo *et al.*, 2011).

2.7. Humedal artificial de flujo subsuperficial

Este sistema está compuesto por un elemento poroso que funciona como un filtro biológico por ejemplo grava, piedra volcánica. En este sistema las plantas son sembradas en la parte superior del filtro y las aguas a tratarse pueden ingresar al sistema ya sea de manera horizontal o vertical, como característica de este sistema el agua siempre está por debajo del medio filtrante, en este tipo de sistema podemos identificar a dos variantes como son de flujo subsuperficial vertical y de flujo subsuperficial horizontal (Durán, 2018).

2.8. Humedales de flujo vertical

Los humedales de flujo vertical se diferencian de los demás precisamente por la manera en que el agua residual fluye a través de su lecho poroso. El agua a tratarse por este sistema es distribuida de manera uniforme e intermitente para después percolar hacia la zona de recolección (Arias *et al.*, 2010). El ingreso de agua de manera intermitente se realiza debido a que este sistema a diferencia del horizontal opera con cargas superiores, esto ayuda a que las reacciones aeróbicas sean ejecutadas de manera más rápida y teniendo una mayor oxigenación del agua.(Martínez, 2014).

2.9. Fitorremediación

Corresponde a una tecnología que involucra a las plantas que son capaces de absorber, degradar o tolerar los residuos y contaminantes en lugares intervenidos o suelos alterados, estos procesos de remediación han sido venido estudiados desde el siglo pasado con investigaciones de suelos contaminados con radionúclidos por Nishita y sus colegas en la década de 1950 (Willey, 2007), La fitorremediación se caracteriza por ser una limpieza pasiva debido a que las plantas actúan como filtros biológicos

descomponiendo y estabilizando los contaminantes en sus órganos vegetales, para posteriormente metabolizarlos a través de la fotosíntesis y transformarlos en compuestos menos peligrosos (Arias et al., 2010). Las especies vegetales en este medio son de gran importancia por lo que es necesario saber más de las mismas.

2.10. Amaranto (*Amaranthus spp.*)

Corresponde a plantas con 70 especies aproximadamente distribuidas en el mundo, 40 de estas se encuentran en el continente americano, su domesticación se dio en la zona tropical, en donde a través de selecciones se obtuvo variedades con inflorescencias mayores (Luis et al., 2018). En el cono sur esta especie se encuentra distribuida a lo largo de la Cordillera de los Andes, teniendo dos especies de consumo el (*Amaranthus caudatus*) o Kiwicha en el Perú y el (*Amaranthus cruentus*) o el Ataco en el Ecuador, esta última corresponde a una planta erguida de tallo herbáceo e inflorescencias rojas color vino en forma de panoja, es una planta C4 de crecimiento rápido y resistente a climas extremos, esta planta tiene una alta concentración de proteínas y grasas en sus semillas con respecto a otros alimentos tradicionales (Peralta, 2012).

Tabla 1: Comparación de las calorías y Proteínas del Amaranto con otros alimentos

Alimento	Proteínas	Calorías (en 100g)
Amaranto	13-17%	400
Quinoa	14-15%	360
Trigo	10-12%	340
Cebada	9-11%	350
Maíz	9-10%	350
Arroz	7-8%	360

Fuente: (Peralta, 2012)

2.11. Quinoa (*Chenopodium quinoa*)

Se encuentra distribuida en los Andes, esta especie ha sido cultivado desde el periodo prehispánico, y es caracterizada por su alto valor nutricional, su morfología corresponde a tener un tallo lignificado con una raíz pivotante, consta de una inflorescencia en forma de panoja compactas; esta se cultiva desde los 0 hasta los 4000 msnm en suelos con texturas variadas y en rango de pH de 4 a 9, esta especie tolera factores climáticos extremos tanto en la sierra como en la costa entre ellos las heladas, suelos salinos y sequías (Gómez y Aguilar, 2016). En el Ecuador la Quinoa ha venido siendo un cultivo de suma importancia, siendo el tercer país que se incorporó a la investigación de esta planta, actualmente el cultivo se encuentra distribuida por toda la sierra y se encuentra

como un cultivo de agricultura familiar campesina teniendo un crecimiento del cultivo a partir del año 2009 y se ubica como un cultivo fructífero para ser exportado (Bazile et al., 2014).

2.12. Achira (*Canna indica*)

Pertenece al género único *Cannaceae*, es una especie originaria de la zona Andina, es una planta herbácea con un tallo robusto ramificados hacia la inflorescencia, con hojas alternas, su inflorescencia es de espiga o ramo simple ramificado con flores grandes y vistosas, las raíces son tallos subterráneos más conocidos como rizomas (Torres, 1999). Esta planta es adaptable a distintos suelos desarrollándose mejor en suelos francos, franco arenosos y ricos en materia orgánica, tolerando un pH ligeramente ácido de 5 a 6,5, su piso altitudinal va desde los 0 hasta los 3000 msnm la achira es ubicada como una de las plantas con un importante valor comercial ya que la planta genera distintos productos (Carrillo, 2014).

3. Materiales y métodos

3.1. Ubicación y descripción del área de estudio

El área en estudio se ubica en la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) en Ucubamba (Figura 1) de la Empresa de Telecomunicaciones, Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de Cuenca ETAPA EP, en la zona de los humedales artificiales, en la ciudad de Cuenca, al sur de la sierra ecuatoriana, con una altitud de 2500 m.s.n.m con coordenadas UTM X: 727.879 Y: 9.681.004 (Figura 1), con una temperatura promedio anual de 14 °C. El efluente que llega a la planta proviene de un sistema de alcantarillado combinado, de agua residual y pluvial.

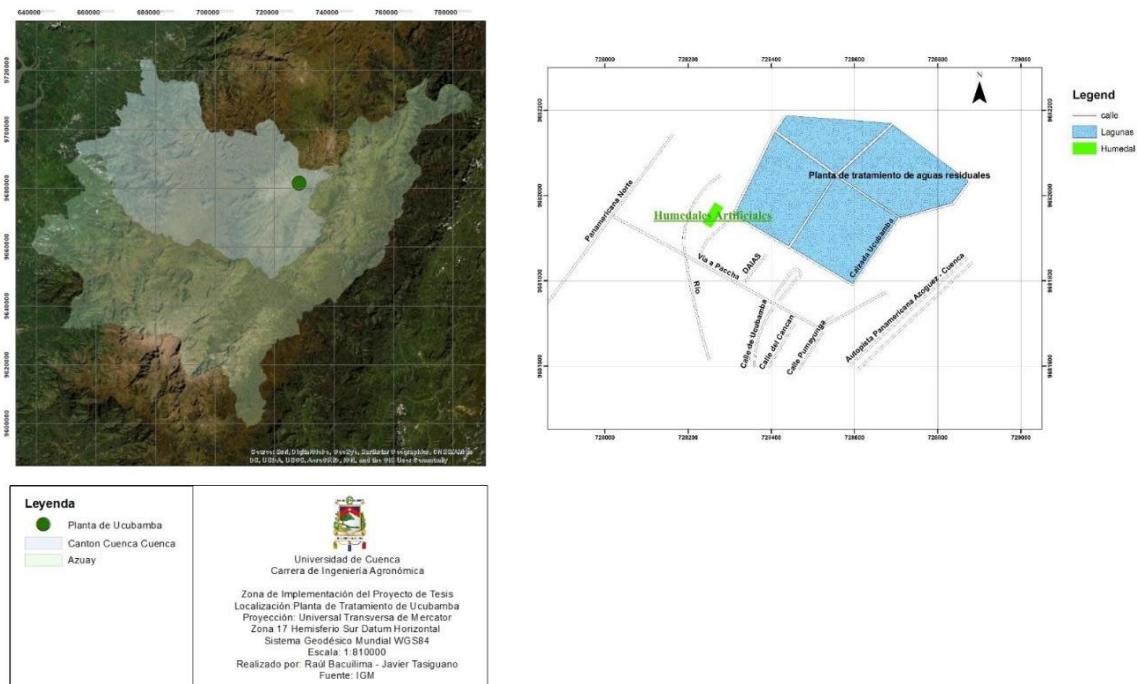


Figura 1: Área de instalación de los HAFV

Fuente: Autor

3.1.1. Delimitación del área de estudio

Se delimito el área asignada por ETAPA en la zona de investigación a continuación de los humedales artificiales, el área superficial de instalación de los humedales artificiales corresponde a 28 m², 7 metros (m) de largo por 4 m de ancho (Figura 2)



Figura 2: Señalización del área de estudio

Fuente: Autor

3.1.2. Ubicación de los humedales artificiales.

Se ubicaron las tinas en el área de estudio tomando el al agua residual de los efluentes de los 4 humedales artificiales un humedal horizontal y tres humedales verticales de acuerdo con el diseño mostrado en la (ver Figura 3).

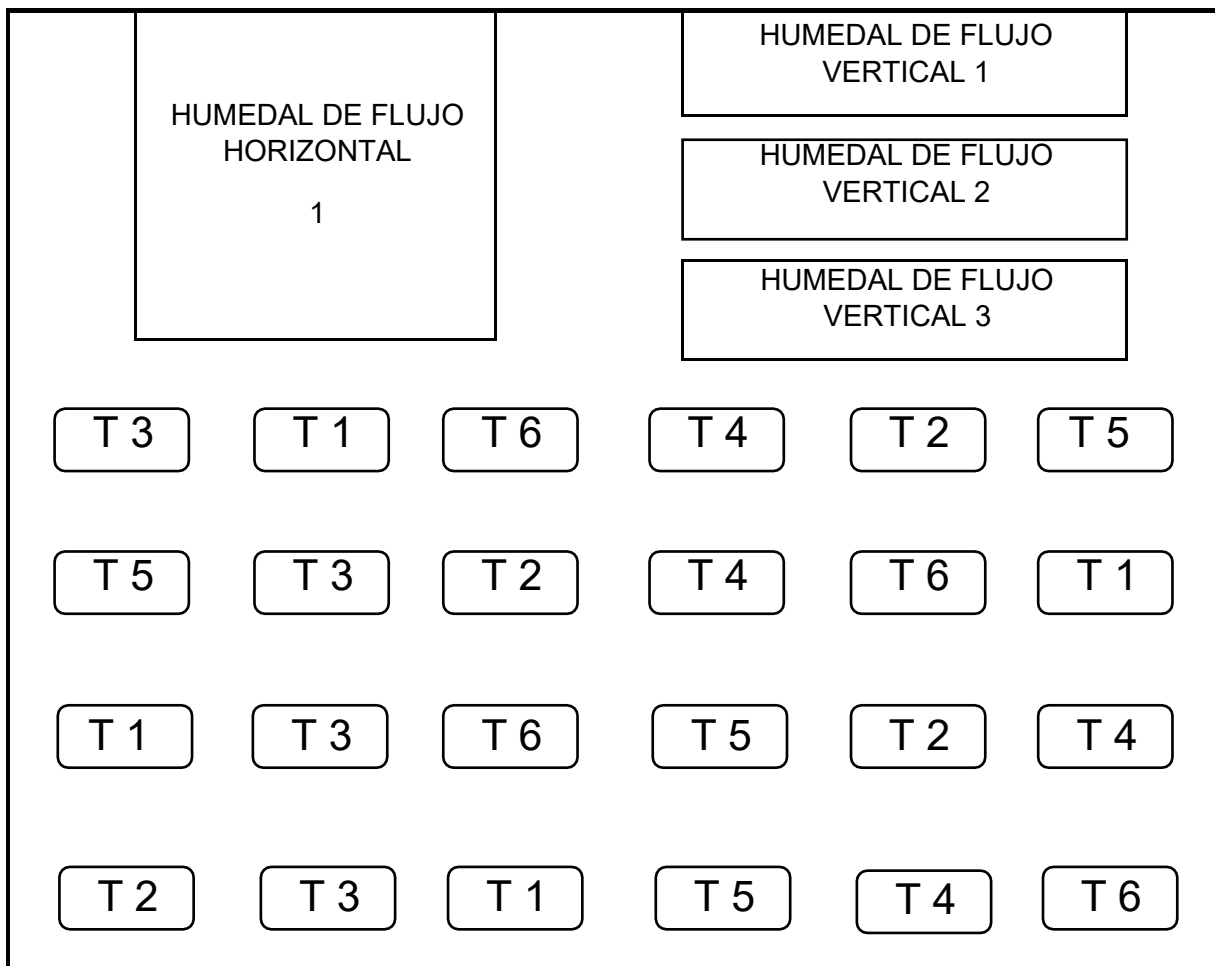


Figura 3:Esquema de la ubicación de los HAFV en el área de estudio

Fuente: Autor



Figura 4: Ubicación de los HAFV en Campo

Fuente: Autor

3.2. Instalación de los humedales artificiales

3.2.1. Adaptación de las tinas para los humedales artificiales

Siguiendo la metodología de construcción de humedales artificiales, tal como se describe en Dotro et al.(2021), se llevó a cabo una adaptación específica, con el propósito de alcanzar los objetivos planteados. Esta adaptación implicó la incorporación de acoples de salida de agua y medidas de impermeabilización en las tinas utilizadas. Estas mejoras se implementaron con el fin de prevenir la filtración de agua residual y, en consecuencia, mitigar el riesgo de contaminación en el área de estudio.



Figura 5: Tinas para ser usadas como HAFV

Fuente: Autor

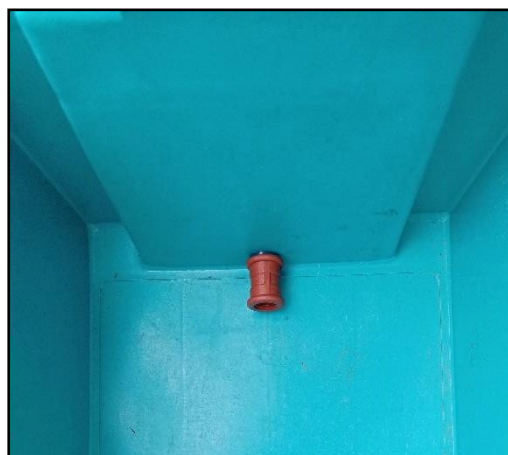


Figura 6: Acople interno con filtro de malla

Fuente: Autor



Figura 7: Acople externo

Fuente: Autor

3.2.2. Ubicación del material filtrante.

Para la confección del filtro o material filtrante se colocaron 3 tipos de grava, las cuales se diferenciaron según el diámetro de la misma (Dávila y López, 2020; Luna y Aburto, 2014)

- Grava fina 8mm
- Grava media 16 mm
- Grava gruesa 32mm



Figura 8: Calibre de grava para el medio filtrante

Fuente: Autor

La grava gruesa fue ubicada en el fondo de cada una de las tinas a 15 cm de alto, posteriormente en los siguientes 15 cm se ubicó la grava media y en la última medida de los 10 – 15 cm se ubicó la grava fina.



Figura 9: Colocación del medio filtrante en los humedales

Fuente: Autor

3.2.3. Siembra de plantas.

Las especies seleccionadas para la siembra tienen propiedades fitodepuradoras como es el caso de *Amaranthus spp.* y *Chenopodium quinoa* (Amjad et al., 2021; Mata, 2015) y a su vez *Canna indica* ha sido una especie que por lo general se ha sembrado en humedales artificiales obteniendo buenos resultados (Karungamye, 2022), en conjunto las tres especies tienen interés agronómico y soportan el estrés a las que son sometidas en estos sistemas. Para proceder a realizar la siembra se ubicó las fases iniciales de cada especie.

Amaranthus spp. 30 días de la fase de emergencia en la fase vegetativa V3.

Chenopodium quinoa. 30 días de la fase de emergencia V4

Canna indica Estadío 1

Cada planta fue sembrada en la Unidad Experimental (UE), con sustrato solo a la raíz, de manera que las plantas se adapten al medio de cultivo.



Figura 10: Siembra de plantas en los humedales artificiales

Fuente: Autor

3.2.4. Instalación de riego, caudal y drenajes

Para la instalación de riego se realizó un diseño previo para la distribución del sistema, un conjunto 28 humedales construidos, el primer sistema fue conectado a las aguas residuales domésticas previamente tratadas, en el sistema de tratamiento de aguas residuales mediante humedales pilotos construidos en la PTAR, el segundo sistema fue conectado a la tubería de agua potable esta fue distribuida en todos los HAFV con agua potable de cada una de las repeticiones.

El caudal de riego se calculó mediante la fórmula $Q = V/T$ teniendo como resultado 25 litros por hora. De acuerdo con el proyecto planteado la alimentación se ejecutó bajo un régimen completamente discontinuo con ciertos intervalos y ciclos de alimentación descanso. La alimentación se procedió a realizar con intervalos horarios, a cada hora el sistema se abre 15 minutos y distribuye 6.43 litros por micro aspersor, específicamente el tiempo de alimentación a los sistemas fue de 7 días continuos, descansado el doble (14 días). Los drenajes fueron instalados a la salida de los humedales artificiales y conectados a un sistema general de captación de agua residual tratada.

3.3. Manejo del experimento

3.3.1. Metodología para la investigación experimental del Objetivo 1

Se realizó la siembra de las especies nativas el 6 de mayo de 2022, el promedio de tamaño de las plantas al momento del trasplante se situó de la siguiente manera

- *Amaranthus spp* y HAFV con agua potable 5,8 cm
- *Chenopodium quinoa* y HAFV con agua potable 5,72 cm
- *Canna indica* y HAFV con agua potable 6,34

3.3.1.1. *Amaranthus spp*

El muestreo se realizó en las fases vegetativas (V) y reproductivas (R) correspondientemente, se inició la toma de muestras 15 días después del trasplante, en la fase vegetativa V3, V4 en la cual estaban desarrollados los nudos y a partir de dos a cuatro hojas verdaderas hasta el desarrollo de la panoja (Illescas, 2017), la duración total de esta fase en la parcela de experimentación fue de 52 días, hasta la fase reproductiva R6 que corresponde a la formación de la panoja con 63 días desarrollo y maduración del grano 30 días duración de fase 92 días, teniendo un total de 144 días (Basantes y Terán, 2017).

3.3.1.2. *Chenopodium quinoa*

El muestreo se realizó en las fases vegetativas (V) y reproductivas (R) correspondientemente, se inició la toma de muestras 15 días después del trasplante en la fase V3, en las cuales se pudo observar de 2 a 4 hojas verdaderas (Cisneros et al., 2018). La duración total de esta fase en las parcelas de experimentación fue de 48 días

hasta la fase reproductiva R6 está comenzó con el desarrollo, formación y madurez fisiológica de la panoja hasta la fase R10 con una duración de 45 días y por último la fase de madurez fisiológica R11 (Cisneros et al., 2018), correspondiente a 48 días teniendo un total de 145 días.

3.3.1.3. *Canna indica*

La muestra se tomó durante dos etapas del ciclo de desarrollo de la Achira, la primera corresponde al estadio 1 (formación de hojas), y segunda al estadio 2, tiempo en que se forman los brotes laterales y ahijamientos. Según Carrillo (2014), la Achira tiene 9 etapas que se extienden por un periodo de 11 meses. La toma de muestras comenzó 15 días después del trasplante en el estadio 1, que duró 90 días, y luego se recogieron muestras durante 54 días en el estadio 2. Este periodo fue elegido debido a que se produce la mayor asimilación de nutrientes en la planta (Carrillo, 2014), lo que en total abarcó un período de 145 días.

3.3.1.4. Parámetros analizados.

La toma de medidas de las variables altura planta y diámetro de tallo se realizó in situ cada 14 días, y las correspondientes a los parámetros largo de la hoja (Lh), ancho de la hoja (Ah) y área foliar se realizaron cada 21 días.

Tabla 2: Parámetros analizados y la metodología

Parámetro	Método	Unidades	Autor
Altura de la planta	Medida desde la base del cuello hasta el ápice de la inflorescencia en el caso de <i>Amaranthus spp</i> y <i>Chenopodium quinoa</i> En <i>Canna indica</i> se tomó la medida desde la base hasta el ápice de la planta	cm	(Jiménez, 2017) (Lobo et al., 2016)

Diámetro del tallo	Mediciones a 5 cm desde la base mediante un calibre milimétrico Vernier	cm	(Jiménez, 2017)
Largo de lámina foliar	Toma de muestras en campo, escaneado, longitud desde la base hasta el ápice de la hoja, análisis mediante el software Image J	cm	(Rasband,2015)
Ancho de la lámina foliar	Toma de muestras en campo, escaneado, longitud en la parte más ancha de la hoja, análisis mediante el software Image J	cm	(Oviedo et al., 2022)
Área Foliar	Toma de muestras en campo, escaneo de hojas y análisis del área mediante el software Image J	cm ²	(Guerrero y Quintero, 2012)

Fuente: Autor



Figura 11: Mediciones las variables morfológicas de las plantas

Fuente: Autor



Figura 12: Cálculo del área foliar, Image J

Fuente: Autor

3.3.1.5. Análisis Estadístico

Los datos obtenidos de las variables analizadas se sometieron a análisis de normalidad de Shapiro-Wilk y Homocedasticidad de Levene, posteriormente se realizó un análisis de varianzas (ANOVA) y una prueba de comparación de (Tukey 5%) para cada una de las variables analizadas en los diferentes tratamientos. Fue realizado un análisis de la curva de crecimiento con respecto a las variables, de altura, diámetro, largo y ancho de la hoja y área foliar de las plantas en función del tiempo.

3.3.2. Metodología para la investigación experimental del Objetivo 2

3.3.2.1. Análisis vegetales

Se realizaron análisis vegetales en las siguientes fases reproductivas (R) de *Amaranthus spp*, (R) *Chenopodium quinoa* y el estadio (2) de *Canna indica* respectivamente; se procedió a tomar muestras destructivas de los órganos de las plantas, raíz, hojas, tallo e inflorescencias, y se pesaron 500 gramos de muestras representativas de cada uno de los tratamientos, Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP, 2021) , estas muestras fueron enviadas a los laboratorios del INIAP Santa Catalina Quito y se analizaron los siguientes parámetros.

Tabla 3: Análisis de nutrientes en tejido vegetal

Parámetro	N	P	K	Ca	Mg	S	B	Zn	Cu	Fe	Mn
Unidades	%	%	%	%	%	%	Ppm	Ppm	Ppm	Ppm	Ppm

Fuente: Autor

3.3.2.2. Análisis de agua

Las actividades de monitoreo de análisis de agua fueron establecidas cubriendo tres etapas durante del estudio, inicio, mitad y final del proyecto de investigación. La toma de muestras de agua se lo hizo de acuerdo a la metodología de Lituma (2016), la hora de toma de muestras fue a las 8 de la mañana a inicios del periodo de descanso en los humedales estudiados.

Tabla 4: Análisis de parámetros físico-químicos del agua en humedales artificiales

PARÁMETRO	UNIDADES	PROCEDIMIENTO
pH	Unidades	MNE 2320-B
Turbiedad	UNT	MNE 2130-B
Sólidos disueltos totales	mg/L	MNE 2540-C

Conductividad	uS/cm	MNE 2540-C
Oxígeno Disuelto OD	mg/L	MNE 4500-C
Carbono Org., total	mg/L	
Nitrógeno total	mg/L	MNE 4500-B
Nitritos	mg/L	MNE 4500-B
Nitratos	mg/L	MNE 4500-B
Nitrógeno amoniacal	mg/L	MNE 4500-B
Fósforo libre o reactivo	mg/L	MNE 3500-D
Fóforo total	mg/L	MNE 3500-D
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/L	MNE 5210-A
Demanda química de Oxígeno	mg/L	MNE 5220-D
Coliformes totales	NMP/100ml	NTE/INEN

Fuente: Autor



Figura 13: : Toma de muestras de agua de los HAFV con agua residual

Fuente: Autor

3.3.2.3. Análisis Estadístico

Pruebas de normalidad mediante la prueba de Shapiro-Wilk, así como una prueba de homogeneidad de varianza mediante el test de Levene, fueron ejecutadas, Un análisis de ANOVA para determinar diferencias significativas entre los tratamientos y sus respectivos controles, así como, análisis de varianzas entre los meses de tomas de análisis de agua para identificar diferencias significativas entre los periodos de tomas de muestra. Además, fue realizado un análisis de conglomerados y similitudes mediante el método de Ward (Análisis de clústeres) con distancia euclidiana con los parámetros de agua residual y su dinámica con las especies vegetales.

3.3.3. Metodología para la investigación experimental del Objetivo 3

Para cumplir este objetivo se realizó una correlación de las variables con respecto al riego en las unidades experimentales y el crecimiento de las plantas durante todo el proceso.

Tabla 5: Análisis de parámetros de crecimiento y desarrollo de plantas en humedales artificiales

Parámetro	Método	Unidades	Autor
Longitud de raíces	Análisis destructivo, mediciones desde el cuello de la planta en toda la longitud de la raíz	cm	(de León González et al., 1997)
Peso Fresco	Análisis destructivo de la planta, peso de la planta inmediatamente después de su extracción del humedal artificial	cm	(Peña y Cely, 2011)
Peso Seco	Material vegetal del peso fresco, ubicado a temperaturas de 70 grados por 48 horas	cm	(Peña y Cely, 2011)

Fuente: Autor

3.3.3.1. Análisis estadístico

Pruebas de normalidad mediante la prueba de Shapiro-Wilk, prueba de homogeneidad de varianza mediante el test de Levene y análisis de varianza para determinar la diferencia significativa entre las especies implementadas en los humedales artificiales con respecto a los elementos de las plantas N, P, K, Ca, Mg, S, B, Zn, Cu, Fe, Mn, peso seco, peso fresco y longitud de las raíces, esta última de particular importancia ya que determina la incorporación de oxígeno en el humedal. Además, se determinó el porcentaje de eliminación de DBO₅ y DQO, así como el porcentaje de absorción de nutrientes para cada una de las especies analizadas. Para establecer la relación entre el crecimiento de la vegetación y los periodos de riego en cada humedal artificial, se realizó un análisis de correlación con los componentes principales PCA entre las horas totales de riego, y variables de altura, diámetro, área foliar y los elementos químicos de las plantas.

4. Resultados y discusión

El crecimiento de las tres especies *Amaranthus spp.*, *Chenopodium quinoa*, y *Canna indica* analizadas como plantas sembradas en el sustrato de los humedales artificiales de flujo vertical (HAFV) utilizados para el tratamiento de las aguas residuales tuvo una marcada diferencia con respecto a las plantas sembradas en los testigos controles las cuales fueron alimentadas con agua potable. El aprovechamiento de los elementos inorgánicos que contienen estas aguas por parte de las plantas fue favorable, de la misma manera su adaptación a este medio y su acción Fito depuradora en el tratamiento de aguas residuales les ubica dentro de las especies que pueden ser utilizadas para estos fines.

En la investigación realizada en los HAFV, se evaluaron los efectos del riego con agua residual y agua potable en las variables: altura de la planta, diámetro del tallo y área foliar, en la fase vegetativa y reproductiva. Al aplicar pruebas de normalidad y homogeneidad, se encontró que todos los datos cumplieron con los supuestos necesarios para análisis estadísticos posteriores, con valores de (Shapiro-Wilks) $p > 0,05$ y Levene superiores a 0,99 respectivamente (ver Tabla 6).

Las pruebas estadísticas utilizando el análisis de varianza (ANOVA) ubicaron al $p < 0,05\%$, y la prueba de Tukey demostró que las especies en los HAFV alimentados con aguas residuales tuvieron respuestas satisfactorias si se compara con los humedales control. Investigaciones previas con estas mismas especies han demostrado que se adaptan bien al riego con aguas residuales y muestran mejores rendimientos en comparación con los cultivos tradicionales o los controles respectivos.

Estudios realizados en Marruecos, muestran al *Amaranthus spp* irrigado con aguas residuales domésticas, y al igual que en nuestro estudio, se obtuvieron mejores rendimientos que en las plantas irrigadas con agua de riego convencional (El Youssfi et al., 2012). En este mismo país se experimentó con *Chenopodium quinoa*, obteniéndose rendimientos similares a los de un cultivo tradicional bajo un sistema de fertilización y con riego normal (El Youssfi et al., 2012). De igual manera, se ha informado de una alta eficacia en la eliminación de contaminantes y en la absorción de nutrientes por parte de *Canna indica* en humedales artificiales con aguas residuales domésticas (Karungame, 2022), (ver Tabla 6)

Tabla 6: Análisis de Normalidad y Homogeneidad de Varianzas de altura, diámetro y área foliar

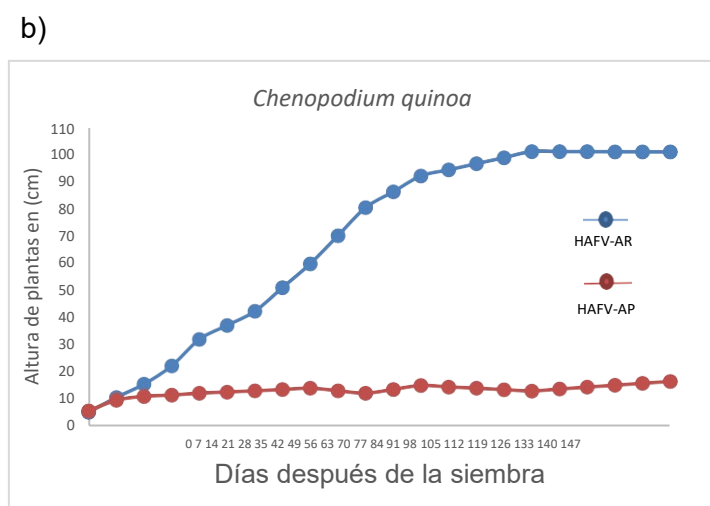
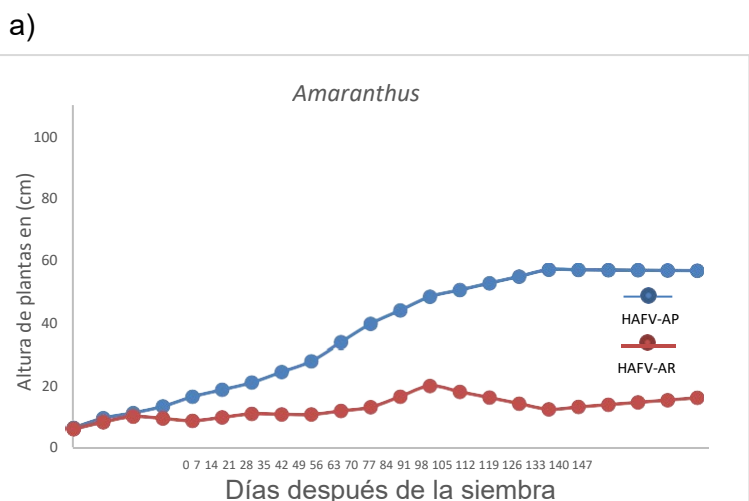
Variable	Normalidad		Homocedasticidad
	W*	Shapiro-Wilks	LEVENE
Altura en la fase vegetativa	0,97	0,5017	>0,99
Altura en la fase reproductiva	0,97	0,3718	>0,99
Diámetro en la fase vegetativa	0,97	0,5213	>0,99
Diámetro en la fase reproductiva	0,97	0,4171	>0,99
Área foliar en la fase vegetativa	0,94	0,4138	>0,99
Área foliar en la fase reproductiva	0,93	0,2425	>0,99

Fuente: autor

4.1. Caracterización del proceso de crecimiento del *Amaranthus spp.*, *Chenopodium quinoa*, y *Canna indica* cultivados en humedales construidos de flujo vertical para tratamiento de aguas residuales.

4.1.1. Altura

Las plantas que estuvieron bajo alimentación con agua residual tuvieron un mayor desarrollo con respecto las especies que se regaron con agua potable, *Amaranthus spp* llegó a medir 57cm de altura, mientras que el control en agua potable alcanzó los 16cm (Figura 14a). *Chenopodium quinoa* llegó a medir 100 cm al final de todas sus etapas fenológicas (Figura 14b) y *Canna indica* al final de sus etapas fenológicas obtuvo una altura de 37cm (Figura 14c)



c)

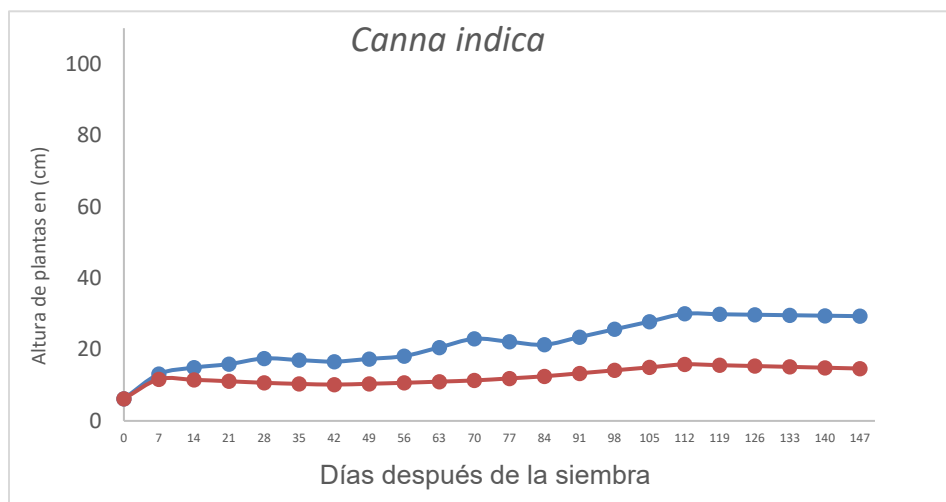


Figura 14: Curva de la altura de las plantas entre los HAFV-AR y HAFV-AP

4.1.1.1. *Amaranthus spp*

Esta especie desarrolló una mayor altura en aguas residuales domésticas con respecto al tratamiento con agua potable, los resultados obtenidos a través de las pruebas de Tukey, presentados en la Figura 15 y la Figura 16, indicaron una diferencia significativa en las medias al finalizar las etapas vegetativa (V4) y reproductiva (R6), respectivamente.

Tabla 7: ANOVA de la altura de *Amaranthus spp* en la fase vegetativa y reproductiva $p < 0,05$

Fuente de Variación	Fase vegetativa		Fase reproductiva	
	F calculado	P valor	F calculado	P valor
Bloques	2,81	0,0675	1,34	0,2925
Tratamiento	103,87	6,17E-09	112,46	6,21e-10

Fuente: Autor

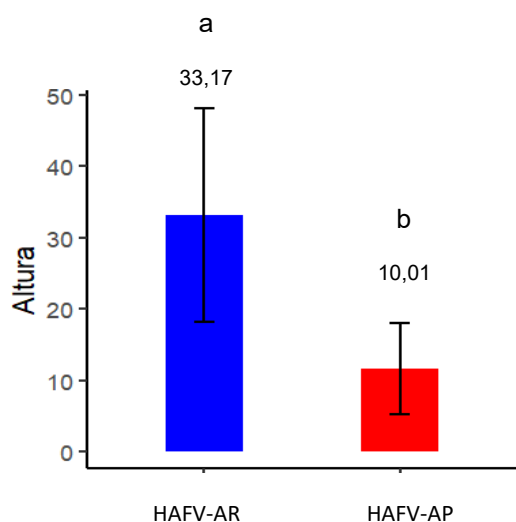


Figura 15: Comparación de medias entre HAFV-AR y HAFV-AP en la fase vegetativa (V4)

Fuente: Autor

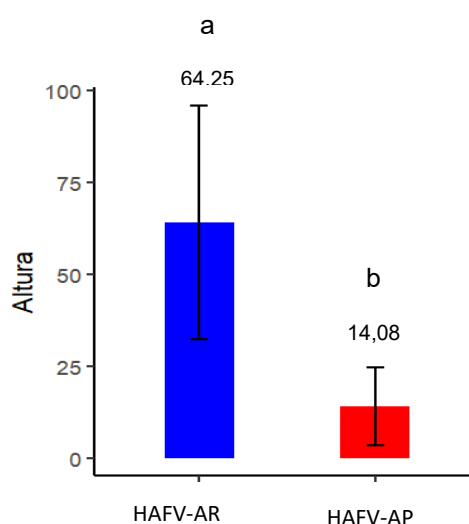


Figura 16: Comparación de medias entre HAFV-AR y HAFV-AP en la fase reproductiva (R6)

Fuente: Autor

Estos hallazgos son consistentes con los informados por Coulibaly et al. (2007), quienes encontraron que el riego de cultivos de *Amaranthus spp.* con aguas residuales en HAFV produjo una altura de 47 cm durante los primeros 50 días de crecimiento tamaño mayor en comparación con la misma especie cultivada en humedales artificiales que utilizaban agua de riego.



Figura 17: *Amaranthus spp* en HAFV-AP

Fuente: Autor



Figura 18: *Amaranthus spp* en HAFV-AR

Fuente: Autor

Amaranthus spp., alcanza alturas de hasta 200 cm con una panoja bien desarrollada (Peralta et al., 2008), nuestras especies, a pesar del estrés constante al que las sometimos en los HAFV y al medio de cultivo totalmente diferente al tradicional, se acercaron cifras cercanas con una panoja desarrollada de hasta 130 cm en su punto más alto (ver Figura 18).

El *Amaranthus spp* cultivado en aguas residuales obtiene mejores características de vigorosidad y debido a la cantidad de materia orgánica y el alto contenido de nitrógeno que se encuentra en estas aguas esta especie desarrolla mayores contenidos nutricionales (Ngwenya et al., 2023).

4.1.1.2. *Chenopodium quinoa*

En cuanto a la especie *Chenopodium quinoa*, se observó una marcada diferencia en la altura con respecto al grupo de plantas cultivadas con agua potable en los sistemas hidropónicos después de 48 días de crecimiento. El análisis de varianza demostró que existen diferencias significativas entre los tratamientos ($p < 0,05$) (Tabla 8). Al finalizar la etapa reproductiva en la fase R11, se observó una diferencia significativa entre las plantas cultivadas en los sistemas de agua residual y de agua potable (ver Anexo 5). Se

realizó una prueba ANOVA para determinar la significancia estadística de esta diferencia ($p < 0,05$) (ver Tabla 8).

Tabla 8: ANOVA de la altura de *Chenopodium quinoa* en la fase vegetativa y reproductiva $p < 0,05$

Fuente de Variación	Fase vegetativa		Fase reproductiva	
	F calculado	P valor	F calculado	P valor
Bloques	1,19	0,3404	0,15	0,9304
Tratamiento	60,49	9,40E-08	83,87	1,94E-09

Fuente: Autor

La prueba Tukey demuestra que las plantas alimentadas con aguas residuales alcanzan una mayor altura en comparación las que se encuentran regadas con agua potable, llegando a una altura promedio de 100 cm y de 150 cm en la planta de mayor altura en la fase reproductiva fase R11 (ver Anexo 5), de la misma manera, estudios realizados en Marruecos con agua residual, determinaron que las plantas llegaron a una altura de 107 cm en los mejores tratamientos, en los cuales esta especie tolera 0,92 dS/m de salinidad en aguas residuales (El Youssfi, Choukr-Allah, Zaafrani, Mediouni, Ba Samba, et al., 2012)

La materia orgánica presente en el agua residual determina un mejor rendimiento en el crecimiento de *Chenopodium quinoa*, debido a que esta especie aprovecha los nutrientes que se encuentran en este tipo de irrigación (El Youssfi et al., 2015), de la misma manera esto es evidenciado en nuestra investigación en la cual pudimos observar una mayor vigorosidad de esta planta en los HAFV alimentados con agua residual (ver Figura 19)

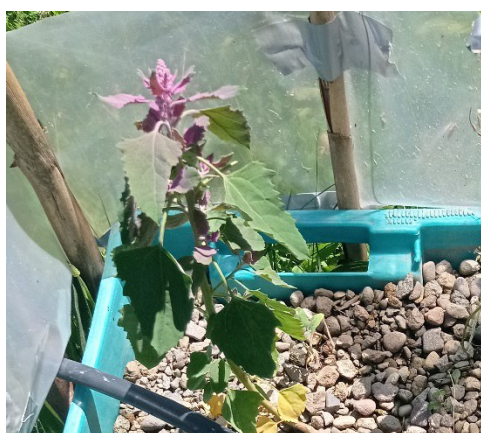


Figura 19: *Chenopodium quinoa* en HAFV-AR

Fuente: Autor



Figura 20: *Chenopodium quinoa* en HAFV-AP

Fuente: Autor

4.1.1.3. *Canna indica*

Al realizar la observación entre los dos sistemas de humedales después de 48 días del estadio 1, se determinó que existe diferencia significativa entre el alimentado con agua residual y el sistema bajo agua potable respectivamente. Después de 147 días del cultivo (estadio 2), la achira irrigada con agua residual duplicó el crecimiento en comparación con las plantas que se encontraban en el control (irrigadas con agua potable) demostrando diferencia significativa en el test de ANOVA ($p < 0,05$) (ver Tabla 9).

Tabla 9: ANOVA de la altura de *Canna indica* en la fase vegetativa y reproductiva $p < 0,05$

Fuente de Variación	Fase vegetativa		Fase reproductiva	
	F calculado	P valor	F calculado	P valor
Bloques	0,95	0,4379	2,93	0,0603
Tratamiento	66,76	4,15E-08	75,81	9,98E-08

Fuente: Autor

Los estudios de Pinninti et al. (2022) demostraron que el cultivo de *Canna indica* en humedales artificiales con agua residual produce brotes más largos en comparación con el cultivo en humedales artificiales con agua potable. Nuestros resultados son consistentes con esta investigación, ya que encontramos que las plantas cultivadas en humedales artificiales con agua residual tienen un tamaño significativamente mayor, con una altura promedio de 40 centímetros y una planta en los estadios 3 y 4, que alcanzó medidas cercanas a los 100 cm de altura, (ver Anexo 6).

Canna indica irrigada con agua residual en HAFV con aguas residuales determina una mayor adaptación y vigorosidad, debido a que es una especie que aprovecha mucho mejor el uso de aguas residuales, y se desarrolla más rápido mediante el aprovechamiento de los nutrientes del agua residual (Zhang et al., 2007), esto es visible en la Figura 21.



Figura 21: *Canna indica* en HAFV-AR

Fuente: Autor



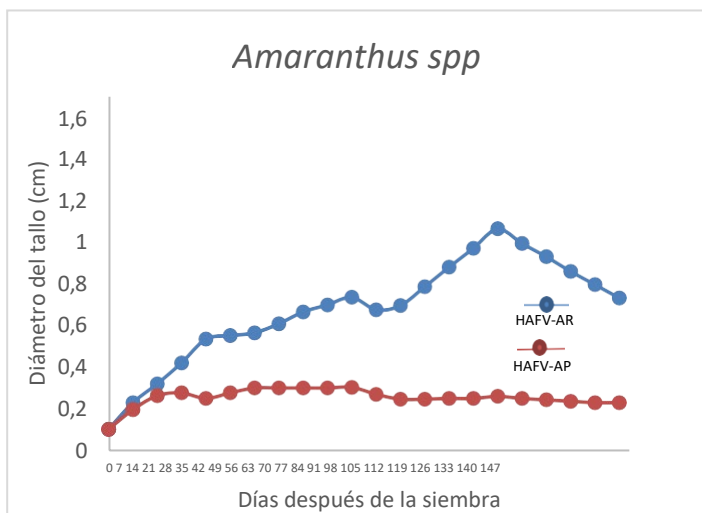
Figura 22: *Canna indica* en HAFV-AP

Fuente: Autor

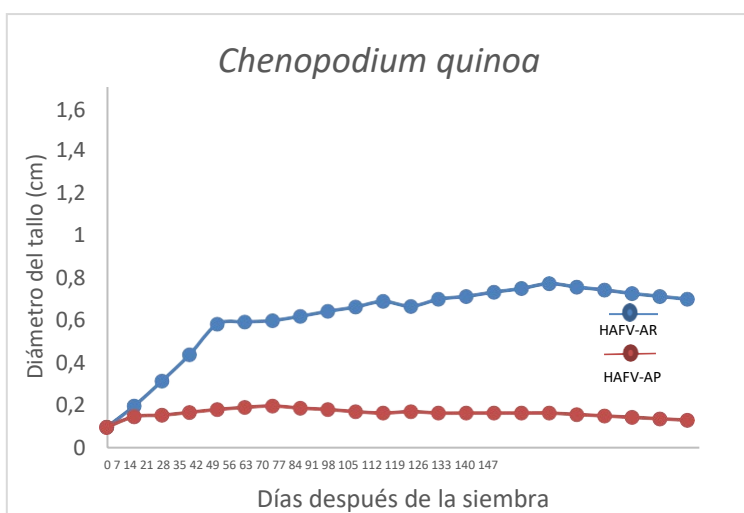
4.1.2. Diámetro del tallo

Las especies sembradas en los HAFV con aguas residuales presentan un mayor diámetro del tallo al finalizar la etapa vegetativa y reproductiva, en comparación con las especies alimentadas con agua potable, tal como se puede observar (Figura 23). Según Mousavi y Shahsavari (2014), en sus estudios de cultivos de interés agronómico en humedales artificiales con aguas residuales determinaron que el diámetro es una de las variables mas perceptibles y que mayor significancia tienen en estos sistemas resultados de longitud de diámetros máximos obtenidos utilizando 75% de agua residual y 25% de agua potable frente al tratamiento de agua potable.

a)



b)



c)

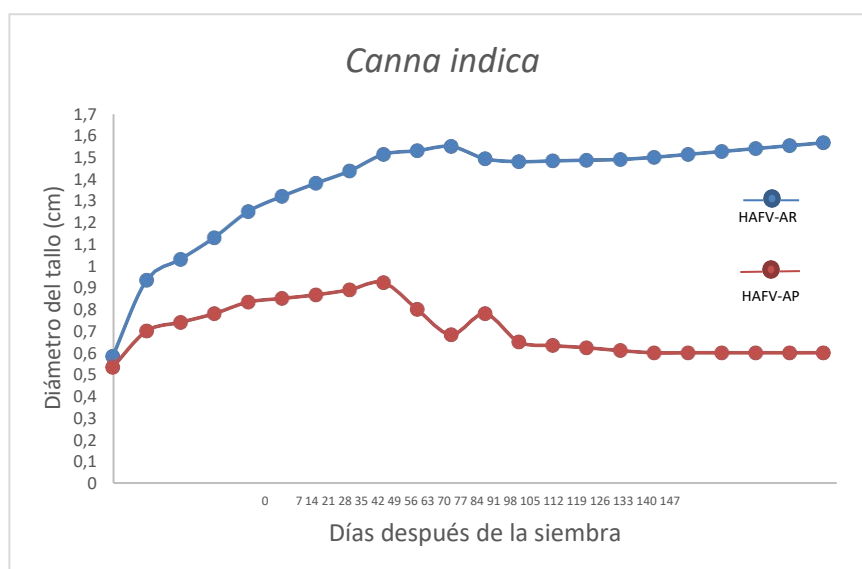


Figura 23: Curva del diámetro de las plantas entre los HAFV-AR y HAFV-AP

4.1.2.1. *Amaranthus spp*

Después de culminar la etapa vegetativa y reproductiva se encontró una diferencia significativa entre las plantas en los HAFV alimentados con agua residual y los HAFV regados con agua potable (ver Tabla 10).

Tabla 10: ANOVA del diámetro de *Amaranthus spp* en la fase vegetativa y reproductiva $p < 0,05$

Fuente de Variación	Fase vegetativa		Fase reproductiva	
	F calculado	P valor	F calculado	P valor
Bloques	1,07	0,383	2,49	0,0909
Tratamiento	39,62	2,65e-06	97,30	8,07E-09

Fuente: Autor

De la misma manera mediante la comparación de Tukey se determina que las plantas que están en el sistema de aguas residuales tienen más grosor (ver Figura 24). En relación con estudios de Espitia et al. (2021) han demostrado que esta especie mantiene buenos resultados en entornos no favorables, obteniendo un diámetro del tallo hasta los 3 cm, sin embargo, nuestras especies alcanzaron el grosor en promedio de 0,83 cm (ver Figura 25), esto debido al estrés que las plantas tuvieron en los periodos de descanso.

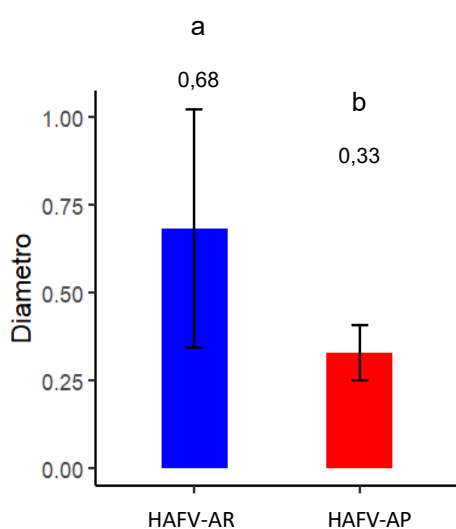


Figura 24: Comparación de medias entre HAFV-AR y HAFV-AP en la fase vegetativa (V4)

Fuente:
Autor

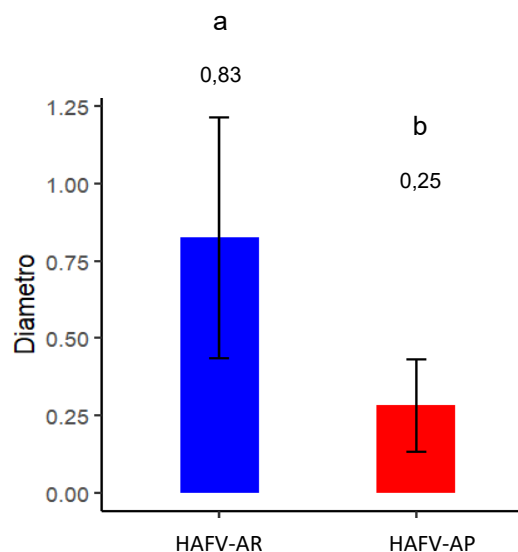


Figura 25: Comparación de medias entre HAFV-AR y HAFV-AP en la fase reproductiva (R6)

Fuente: Autor

El diámetro tanto en la fase vegetativa como reproductiva estuvieron marcados por una diferencia significativas entre los HAFV con agua residual y HAFV con agua potable con $p < 0,05$ entre los tratamientos (ver Tabla 11)

4.1.2.2. *Chenopodium quinoa*

En cultivos con fertilización normal llega a obtener un diámetro de alrededor de 1,30 cm (Cisneros et al., 2018), sin embargo este parámetro en aguas residuales en su fase vegetativa llega a 0,65 cm (Anexo 7, Figura 47) y en la fase reproductiva llega a 0,83 cm (Anexo 7, Figura 48) como promedio, sin embargo en las plantas con una mediad más grande llegan a los 1,21 cm de diámetro, de esta manera podemos ubicar que el cultivo de quinua en aguas residuales determina valores cercanos a un cultivos en medios tradicionales.

Tabla 11: ANOVA del diámetro de *Chenopodium quinoa* en la fase vegetativa y reproductiva $p < 0,05$

Fuente de Variación	Fase vegetativa		Fase reproductiva	
	F calculado	P valor	F calculado	P valor
Bloques	0,36	0,7857		0,6633
Tratamiento	61,60	3,77e-08	130,32	5,52e-11

Fuente: Autor

4.1.2.3. *Canna indica*

El grosor del tallo en *Canna indica* en HAFV alimentados con aguas residuales y agua potable en sus dos fases de análisis tienen diferencia estadística con $p < 0,05$ (ver Tabla 12).

Tabla 12: ANOVA del diámetro de *Chenopodium quinoa* en la fase vegetativa y reproductiva $p < 0,05$

Fuente de Variación	Fase vegetativa		Fase reproductiva	
	F calculado	P valor	F calculado	P valor
Bloques	0,17	0,9174	1,26	0,3147
Tratamiento	8,15	0,0101	63,87	0,0001

Fuente: Autor

La planta *Canna indica* entre el estadio dos y tres llegan a obtener de entre 1 y 2 cm manteniendo una fertilización y riego adecuada (Carrillo, 2014), durante el crecimiento de esta especie, es la única de mantuvo sus tallos totalmente rígidos durante el periodo de descanso y de irrigación, teniendo como resultados al final de la fase vegetativa un diámetro de 1,35 cm y 1,51 cm en la fase reproductiva en los HAFV alimentados con aguas residual y con agua potable, respectivamente (ver Anexo 8), de igual manera la prueba de TUKEY ubica que existe diferencias significativas entre las medias.

4.1.3. Área Foliar (Lh, Ah)

Vymazal y Kröpfelová. (2008), en su recopilación sobre sistemas de humedales artificiales, destacan la importancia del área foliar en estos entornos, ya que las plantas se desarrollan de manera más efectiva en las hojas donde se almacena la mayor parte de los nutrientes. Esto se traduce en una mayor densidad foliar en comparación con los humedales sin aguas residuales. En relación a nuestros estudios, observamos que el área foliar de las especies en el sistema de humedales artificiales con agua residual fue

significativamente mayor que en los humedales con agua potable (Figuras 26). Además, se pudo apreciar picos elevados de área foliar durante el proceso de crecimiento de las plantas, especialmente en el caso de *Canna indica*, lo que indica un resultado exponencial.

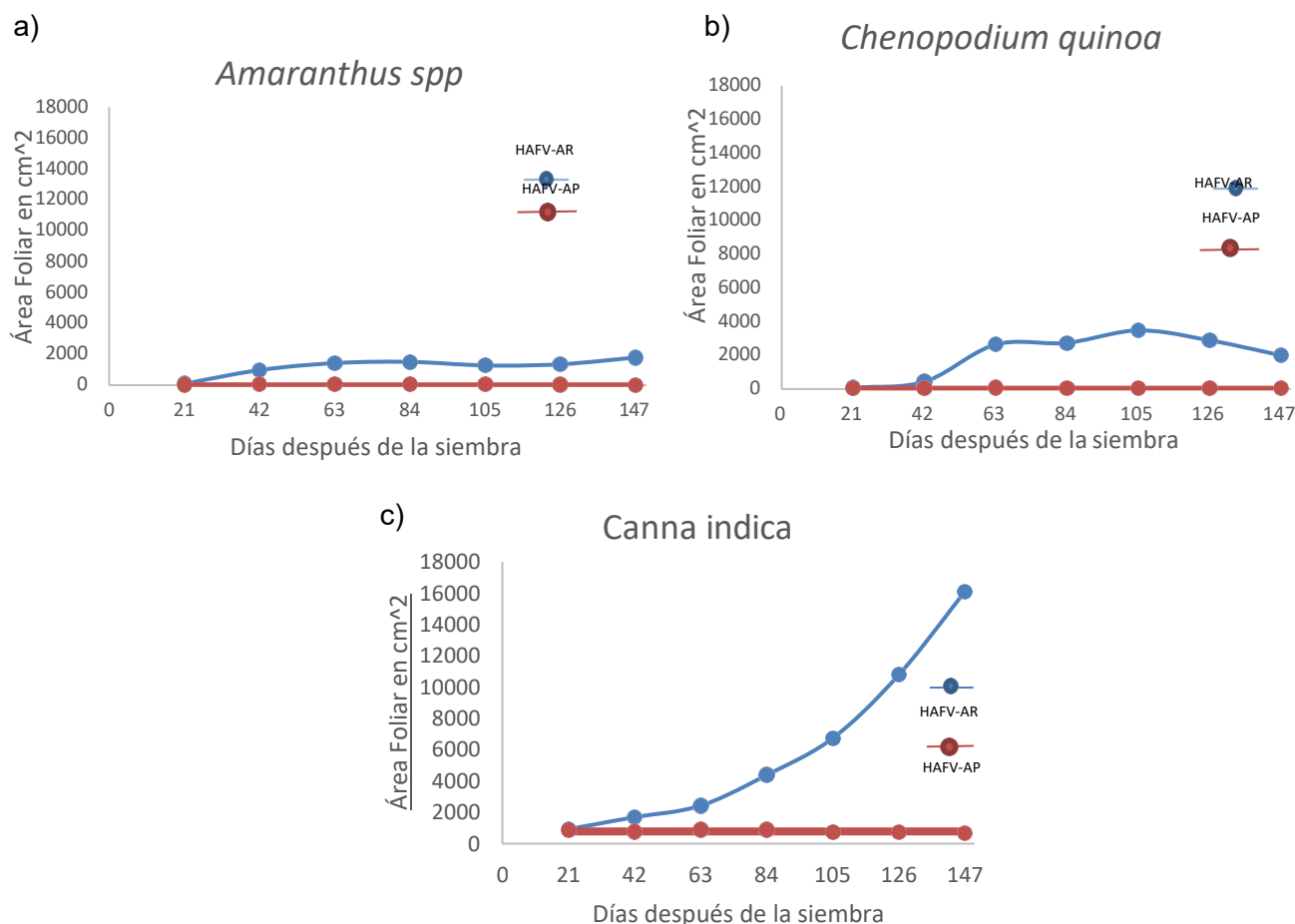


Figura 26 : Curva del área foliar de *Amaranthus spp.* Entre el HAFV-AR y el HAFV-AP

Fuente: Autor

4.1.3.1. *Amaranthus spp.*

El área foliar de *Amaranthus spp.*, en HAFV con agua residual se diferencia significativa de los mismos sistemas en agua potable, con un $p < 0,05$ (Tabla 12) en la fase vegetativa y reproductiva, teniendo mas diferencia en la primera fase, esto debido a que la planta absorbe mayor foto asimilados, coincidiendo con los resultados por (Monroy et al.,2021)

Tabla 13: ANOVA del área foliar de *Amaranthus spp* en la fase vegetativa y reproductiva $p < 0,05$

Fuente de Variación	Fase vegetativa		Fase reproductiva	
	F calculado	P valor	F calculado	P valor
Bloques	0,80	0,5706	1,04	0,4890
Tratamiento	309,67	0,0004	276,03	0,0005

Fuente: Autor

El Youssfi et al. (2012) Determina que el área foliar de *Amaranthus spp* tratada con aguas residuales tiene una mejor área foliar que los sistemas irrigados con agua de riego, teniendo como resultados en sus investigaciones un promedio de 7000 cm² por planta frente a los tratamientos que tuvieron como promedio 4000 cm² por planta, esto en la fase vegetativa de la especie, y en la fase reproductiva obtuvo un promedio de 4000 cm² de área foliar por planta en aguas residuales frente a un promedio de 2000 cm² en agua de riego. Considerando que este estudio comparó el área foliar de esta especie entre aguas residuales domésticas y agua de riego con salinidad, podemos compararlos con nuestros resultados con tratamiento con agua residual y agua potable. La prueba de TUKEY determina que hubo diferencias de medias, las plantas de *Amaranthus spp* alimentadas con aguas residuales obtuvieron 992 cm² en la fase vegetativa (Figura 27) y 2073 cm² en la fase reproductiva (Figura 28) frente a los 55,43 cm² y 20,78 cm² respectivamente en sistemas con agua potable. Aspecto interesante constituye que en nuestro estudio en la fase reproductiva *Amaranthus spp* tiene una mayor área foliar con respecto a los estudios de El Youssfi et al. (2012) que tuvo mejores resultados en la fase vegetativa. (Figura 27).

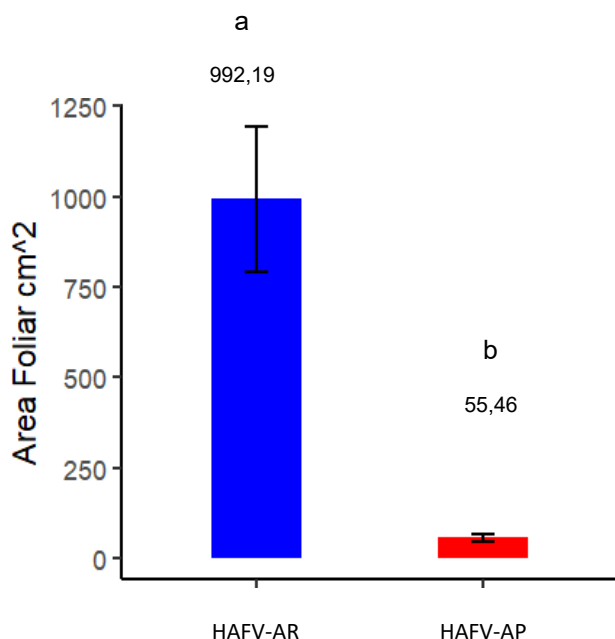


Figura 27: Comparación de medias entre HAFV-AR y HAFV-AP en la fase vegetativa (V4)

Fuente: Autor

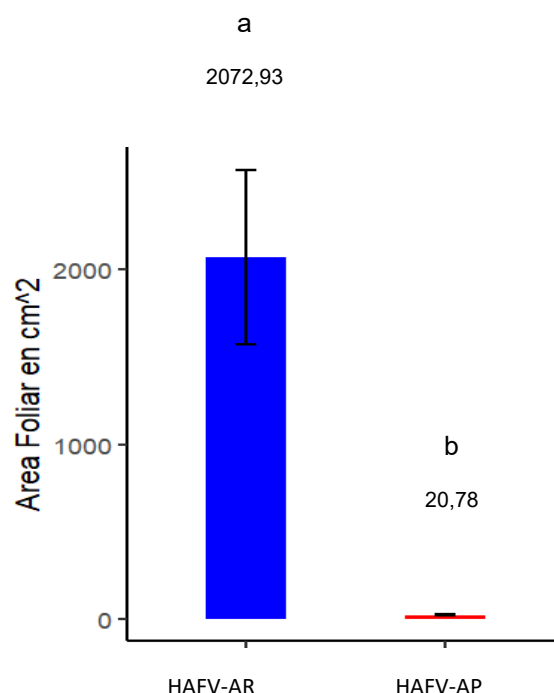


Figura 28: Comparación de medias entre HAFV-AR y HAFV-AP en la fase reproductiva (R6)

Fuente: Autor

4.1.3.2. *Chenopodium quinoa*

Hirich et al. (2012), en sus estudios en *Chenopodium quinoa*, obtiene resultados en los cuales este cultivo bajo aguas residuales domésticas tuvo diferencias significativas con el cultivo bajo riego normal concordando con nuestros resultados debido a que el ANOVA marca una diferencia significativa de $p < 0,05$ en ambas fases analizadas (Tabla 14).

De acuerdo a la prueba de Tukey se pudo determinar que existen diferencias entre las medias de los dos tratamientos para las diferentes fases, obteniendo mayor área foliar en HAFV con aguas residuales en la fase vegetativa (Anexo 9, Figura 51), y una reducción de este mismo parámetro en la fase reproductiva (Anexo 9, Figura 52); los valores de área foliar en la fase vegetativa en HAFV son de 2314cm² y de 2112 cm² en la fase reproductiva, valores similares a los obtenidos en investigaciones realizadas por (El Youssfi et al., 2012; Hirich et al., 2012).

Tabla 14: ANOVA del área foliar de *Chenopodium quinua* en la fase vegetativa y reproductiva $p < 0,05$

Fuente de Variación	Fase vegetativa		Fase reproductiva	
	F calculado	P valor	F calculado	P valor
Bloques	1,02	0,4923	1,03	0,4897
Tratamiento	203,07	0,0007	149,59	0,0012

Fuente: Autor

4.1.3.3. *Canna indica*

Canna indica destaca como una especie altamente efectiva en el cultivo en entornos con aguas residuales gracias a su capacidad de desarrollar una amplia área foliar y un extenso dosel, lo cual le permite capturar luz y nutrientes de manera eficiente. Esta adaptación le confiere un rendimiento sobresaliente en este tipo de medio, característica evolutiva de esta especie, motivo por el cual no tiene inconvenientes a la adaptación a los HAFV (Karungamye, 2022; Pinninti et al., 2022), esta peculiaridad hace que de acuerdo con nuestros resultados obtenidos exista diferencia significativa entre la especie cultivada en los HAFV con aguas residuales y los HAFV con agua potable, tanto en la fase vegetativa como en la reproductiva con valores de $p < 0,05$ (Tabla 15)

Tabla 15: ANOVA del área foliar de *Chenopodium quinoa* en la fase vegetativa y reproductiva $p < 0,05$

Fuente de Variación	Fase vegetativa		Fase reproductiva	
	F calculado	P valor	F calculado	P valor
Bloques	2,16	0,2720	0,73	0,6004
Tratamiento	229,70	0,0006	413,17	0,0003

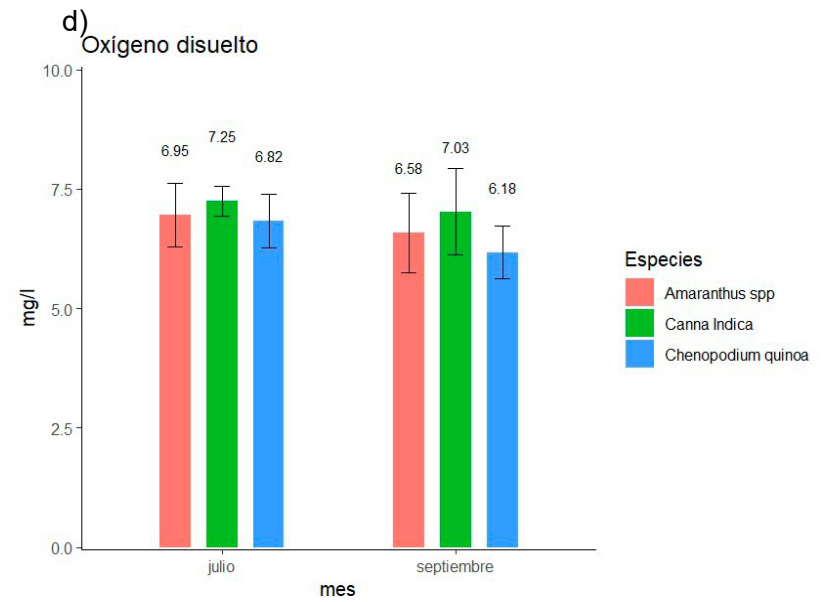
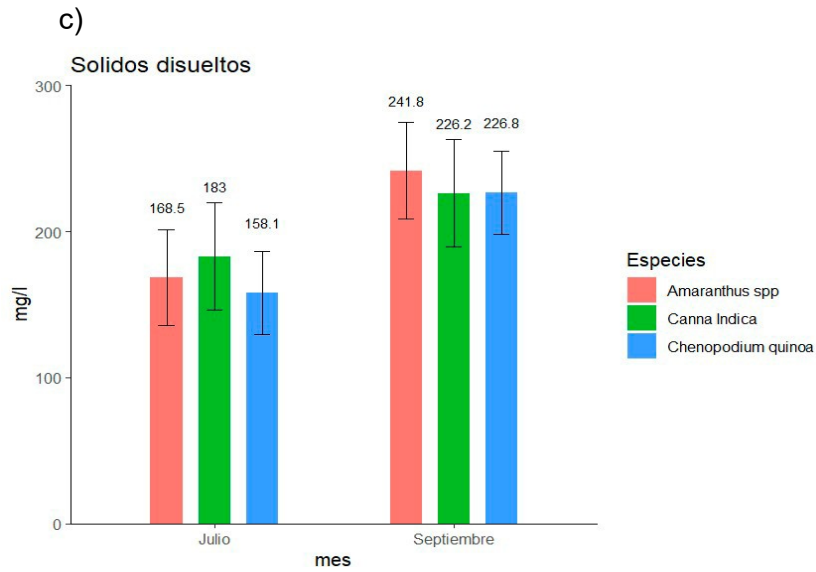
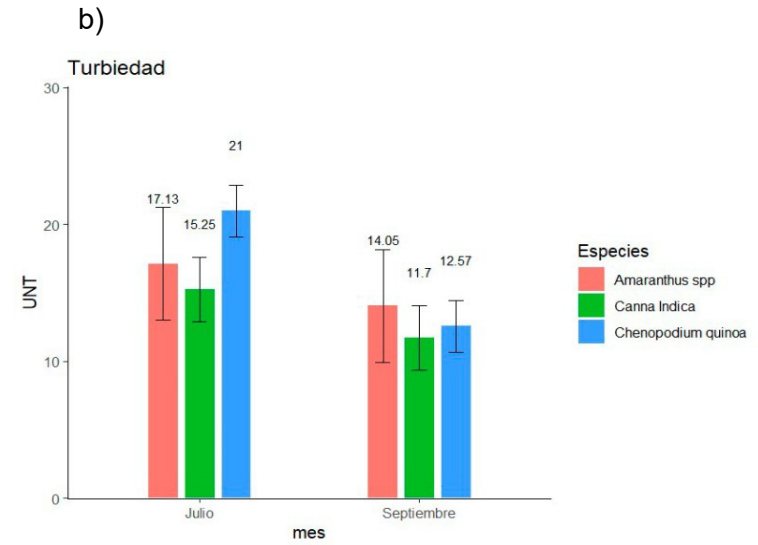
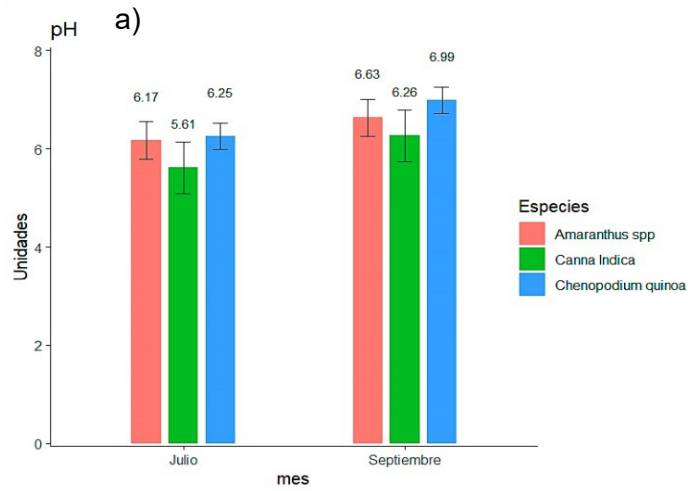
Fuente: Autor

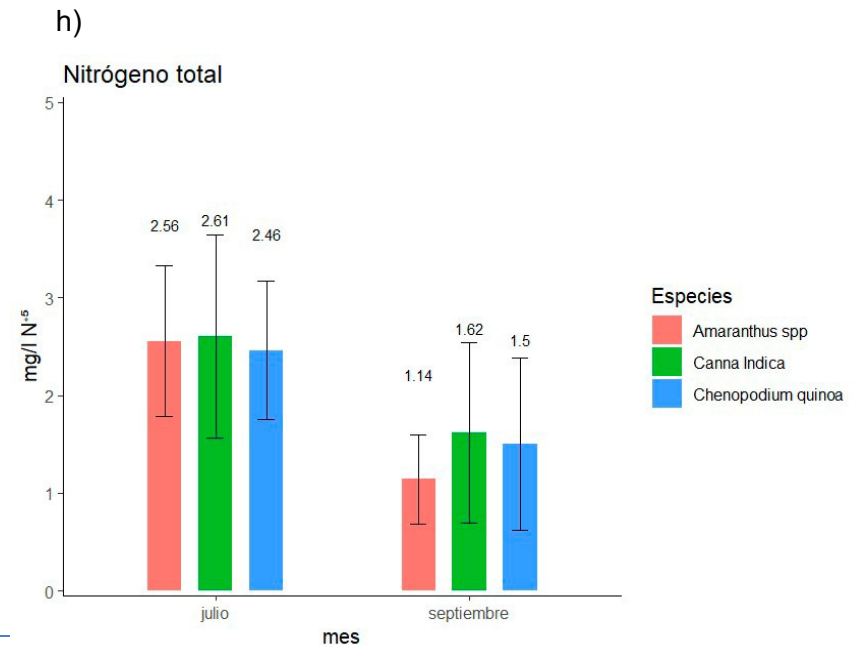
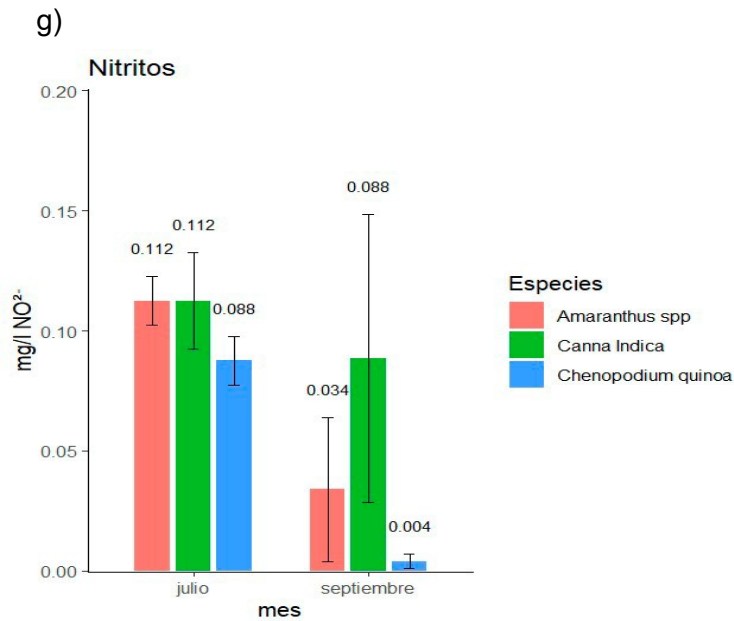
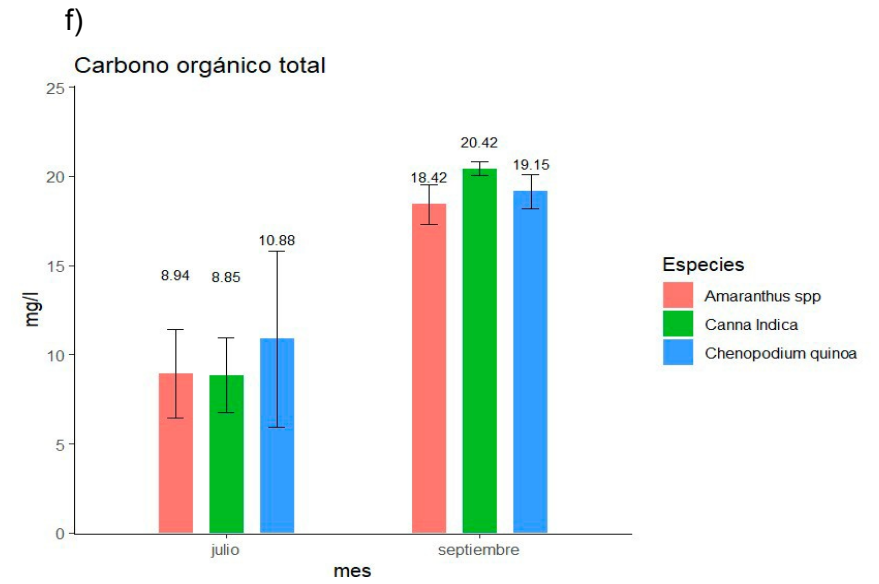
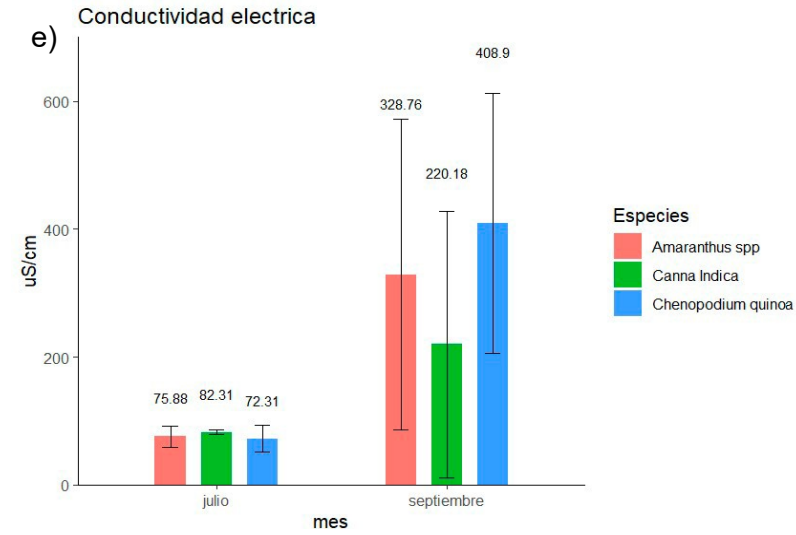
El promedio de área foliar más elevado se dio en la fase reproductiva con 15820 cm^2 (Anexo 10, Figura 53) mientras en la fase vegetativa obtuvimos 2473 cm^2 (Anexo 10, Figura 54) obteniendo una diferencia de medias significativas según la prueba de TUKEY, similares resultados en cuanto al área foliar se encontraron en las investigaciones de Sharma et al. (2021) quienes realizaron investigaciones en las cuales obtuvieron excelentes resultados en *Canna indica* frente a otras especies, ubicándola como una especie que aprovecha los recursos de las aguas residuales.

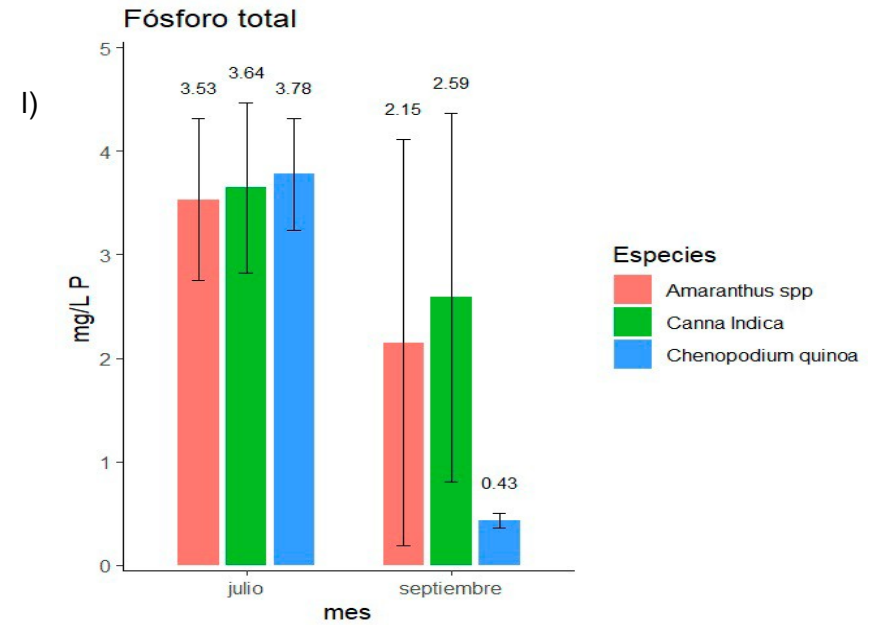
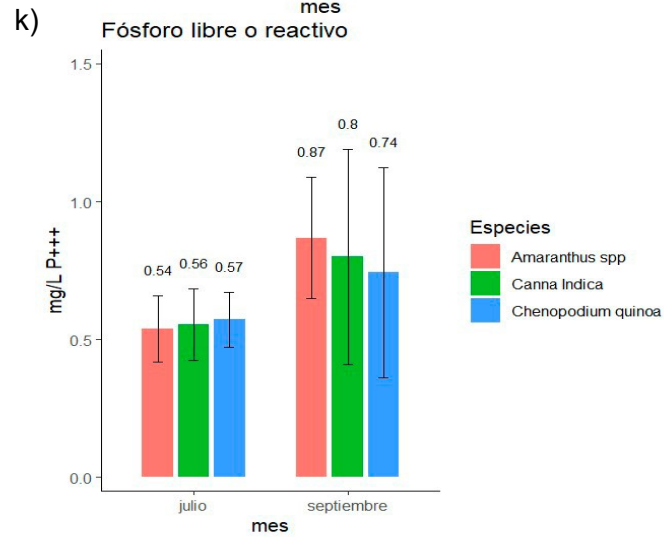
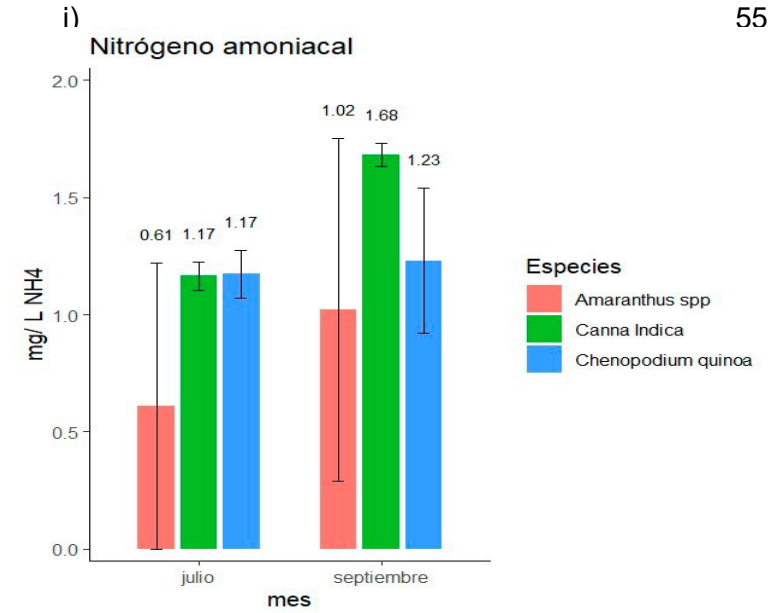
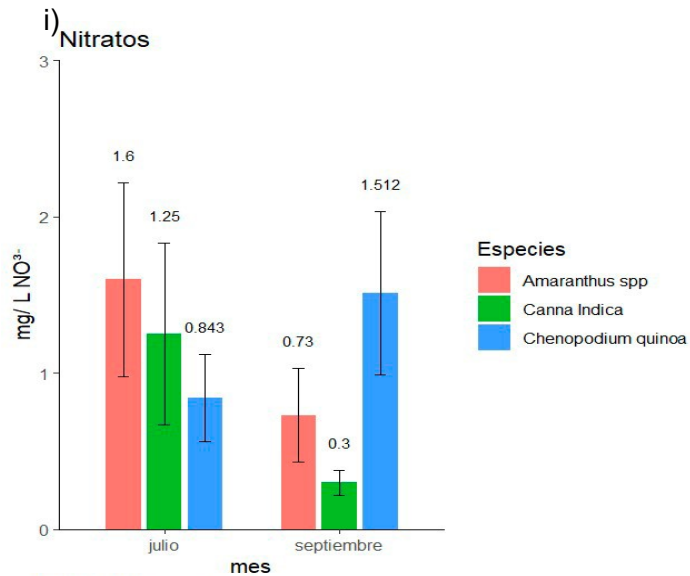
4.2. Determinación de la factibilidad del uso de humedales construidos como técnica de fitorremediación utilizando las especies vegetales nativas

4.2.1. Concentraciones de contaminantes en el efluente de los sistemas de estudio en las dos etapas, vegetativa y reproductiva

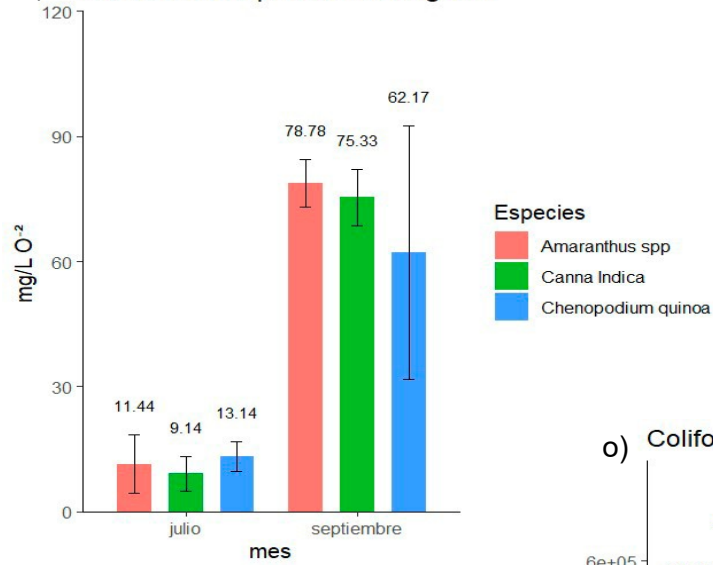
Durante las dos etapas de muestreo, que corresponden a la fase vegetativa y reproductiva, se observaron variaciones en las concentraciones efluentes (salidas) del agua residual. Los resultados obtenidos indicaron que la fase vegetativa presentó mejores valores en cuanto a sólidos disueltos, conductividad eléctrica, carbono orgánico total, nitrógeno, fósforo reactivo y DBO (ver Figura 29 c, e, f, h, k, m). Por otro lado, durante la fase reproductiva se registraron bajos valores de turbiedad, fósforo total y coliformes totales. Las variables de pH, oxígeno disuelto y DQO mantuvieron valores promedios similares en ambas etapas de muestreo (ver Figura 29 a, d, n)



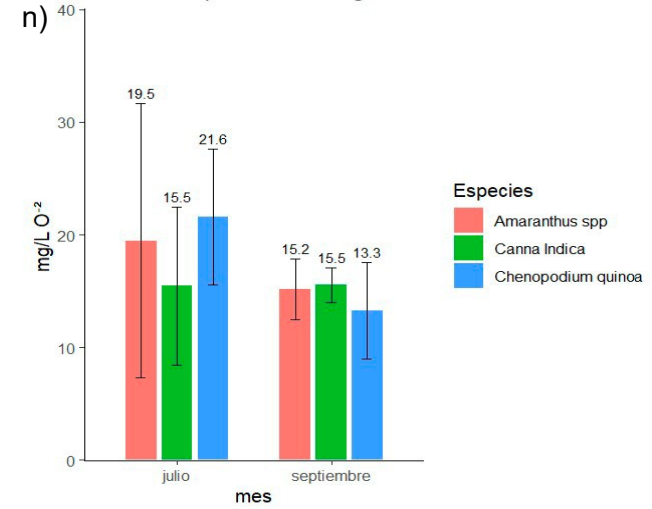




m) Demanda bioquímica de oxígeno



n) Demanda química de oxígeno



o) Coliformes totales

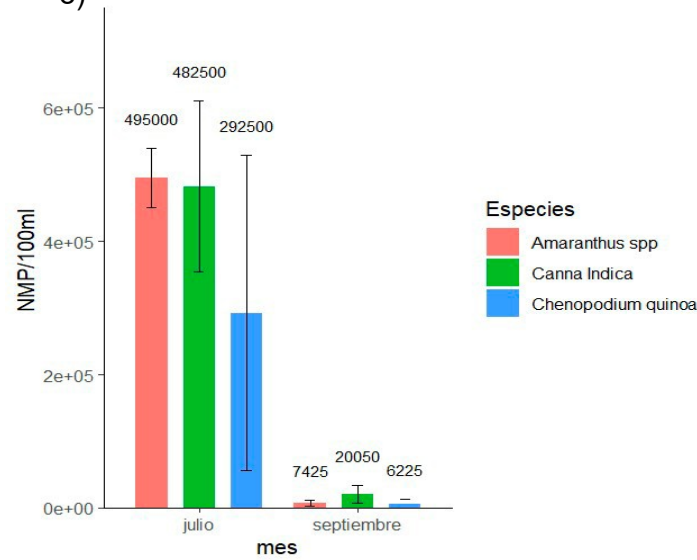


Figura 29: Comparación de medias de los indicadores de contaminantes del agua entre F vegetativa y F reproductiva

Fuente: Autor

Un análisis entre ambas fases en las tres especies vegetales, arrojan que la fase vegetativa mostró niveles menores de concentración de contaminantes en el efluente. Estos resultados coinciden con los hallazgos de Calheiros et al. (2007), quienes también encontraron una disminución en los valores durante las fases vegetativas de las plantas analizadas, entre ellas *Canna indica*. Durante la fase vegetativa de nuestro estudio, se observaron valores reducidos en las variables de pH, sólidos disueltos, CE, COT, NH_3^+ , fósforo libre y DBO (Figura 29 a, c, e, f, j, k, m). Además, se analizaron los parámetros de turbiedad, nitritos, nitratos, DQO y coliformes totales (Figura 29 b, g, n, o), presentan concentraciones efluentes menores en la en la fase reproductiva, esto de acuerdo a Alarcón et al.(2018) los HAFV eliminan contaminantes mediante procesos físicos, químicos y biológicos, incluyendo la degradación bacteriana, la filtración, la sedimentación, la incorporación por las plantas, la volatilización y la precipitación química. La eficacia de eliminación de contaminantes depende de factores como la carga de contaminantes, el régimen hidrológico, la temperatura y el tipo de vegetación, siendo este último ajustado a las fases vegetativas.

En su estudio sobre la *Chenopodium quinoa*, Youssf et al. (2012) encontraron que esta especie es resistente a las aguas residuales y tolera la salinidad sin disminuir el rendimiento de las variables analizadas, y presenta una variabilidad mínima en su morfología. Nuestros resultados coinciden con los hallazgos de este estudio, ya que la especie *Chenopodium quinoa* reduce los indicadores de contaminación y mantiene su vigorosidad durante los periodos de descanso, lo que demuestra su capacidad de resistir y adaptarse a un entorno de estrés en estos sistemas, con mayor facilidad que las otras dos especies estudiadas. .

La especie *Canna indica* ha sido ampliamente estudiada en humedales artificiales, donde se ha encontrado una reducción de contaminantes en un rango del 90 al 95%, con valores promedio de turbidez de 39,33 UNT, DBO de 15,54 mg/L y SST de 34,0 mg/L (Vásquez, 2017). Sin embargo, en nuestro estudio, hemos observado una reducción mucho más significativa de contaminantes, DBO 9,14 mg/L y turbidez 15,25 UNT (Figura 29 b, m).

En el estudio realizado por Coulibaly et al. (2007), se determinó que la variedad de *Amaranthus hybridus* tiene la capacidad de remover DBO, DQO, nitritos, nitratos y nitrógeno amoniacal. En nuestro caso, la especie de *Amaranthus spp.* implementada en los humedales mostró un comportamiento similar al reducir los niveles de contaminantes del agua. Sin embargo, sus promedios y valores más altos estuvieron por debajo de las dos especies *Chenopodium quinoa* y *Canna indica*.

En los humedales artificiales de flujo vertical, los periodos de alimentación/descanso son fundamentales para la oxigenación del medio. Cuando se corta la alimentación, las plantas pueden entrar en un estrés hídrico, pero este problema se puede solucionar fácilmente con la reanudación de la alimentación debido a la retención hidráulica de los humedales de flujo vertical, lo que permite que las plantas recuperen su vigor (Alarcón et al., 2018; Bui et al., 2018; Rubio y Correa, 2006). Esta situación se pudo evidenciar en nuestro estudio, fue constatado que, durante los periodos de descanso, las plantas experimentaron estrés hídrico, siendo *Amaranthus spp* la especie más afectada en términos de disminución de su vigor (ver Figura 30). Sin embargo, se observó que *Chenopodium quinoa* (Figura 31) y *Canna indica* (Figura 32) mantuvieron su vigor, siendo esta última especie la que presentó una apariencia visual similar a la de los periodos de alimentación, aun cuando el humedal estuvo sin suministro de agua.



Figura 30: *Amaranthus spp* con estrés hídrico en el período de descanso del HAFV.

Fuente: Autor



Figura 31: *Chenopodium quinoa* con estrés hídrico en el período de descanso del HAFV

Fuente: Autor



Figura 1: *Canna indica* con estrés hídrico en el período de descanso del HAFV

Fuente: Autor

4.2.2. Análisis de conglomerados y similitudes de la dinámica de parámetros de calidad de agua residual en las tres especies vegetales en los HAFV

En este estudio, utilizamos el análisis de conglomerados y similitudes mediante el método de Ward (Análisis de clústeres) con distancia euclidiana para investigar la dinámica de los parámetros de agua residual en las diferentes especies utilizadas. Los resultados indicaron la formación de 4 grupos diferentes acorde a los valores de calidad de agua residual.

El primer grupo estuvo compuesto por las muestras de *Amaranthus spp* de los bloques 1 y 2 y *Canna indica* de los bloques 1 y 3. Este grupo se caracterizó por tener valores medios de pH, turbiedad, CE, Oxígeno Disuelto, Fosforo total, Fosforo libre; valores elevados en COT, Nitritos, Nitratos, Coliformes y valores bajos de turbiedad, Nitrógeno, DBO y DQO. A pesar de que los valores de DBO y DQO son bajos en las muestras analizadas, los valores elevados de COT, Nitritos, Nitratos y Coliformes (Figura 33) sugieren que puede existir un alto contenido de materia orgánica, esto se debe a que las plantas también incorporan materia orgánica por la descomposición de los órganos vegetales o a su vez se dio una presencia alta de sedimentos por lodos depositados que no fue evacuado oportunamente de manera que, al ser acumuladas en el medio de filtración de los HAFV disminuye a oxigenación en los humedales (Alarcón et al., 2018).

El segundo grupo estuvo compuesto por las muestras *Amaranthus spp* del bloque 4 y *Chenopodium quinoa* del bloque 2, las cuales presentaron valores normales de pH cercano a 7, valores bajos de turbiedad, sólidos disueltos, conductividad eléctrica, COT, nitrógeno total, nitrógeno amoniacal, Fósforo libre, Fosforo total y coliformes; así como: valores medios de Oxígeno disuelto, nitritos, nitratos, DBO y DQO (Figura 33). Los niveles de contaminantes en el efluente se encuentran dentro de los límites máximos permisibles vertiendo a cuerpos de aguas (Ministerio del Ambiente, 2017). Esto debido a que los humedales en su proceso de purificación o degradación de contaminantes pueden obtener valores de remoción alrededor de 30% para DBO y el hasta el 50% para DQO, (Dávila y López, 2020).

El tercer grupo estuvo compuesto por las muestras de *Chenopodium quinoa* del bloque 1. y *Canna indica* del bloque 2 y 4, este grupo presentó valores elevados de sólidos disueltos totales y conductividad, así como valores bajos de nitratos y nitrógeno amoniacal (Figura 33). Este grupo podría estar asociado a una mayor presencia de contaminantes inorgánicos. Finalmente el cuarto grupo se compone de *Chenopodium quinoa* del bloque 3 y 4 con valores altos de turbiedad, sólidos disueltos, conductividad eléctrica, carbono orgánico total, nitratos, nitrógeno amoniacal, fósforo libre, fósforo total, DBO y DQO; y valores medios de oxígeno disuelto, nitrógeno total,

UCUENCA

nitritos y coliformes, en este grupo se encuentran contaminantes orgánicos y nutrientes, a pesar que la DBO y DQO están en valores medios existe la presencia de contaminantes por materia orgánica, debido a los niveles máximos de remoción posibles a obtener según las variables de diseño, cargas de alimentación y características constructivas del humedal. En relación a las especies vegetales, estas se enfocan en la eliminación de las partículas pequeñas de densidad neutra que no se sedimentan y en su lugar utiliza la floculación mediante gradientes de velocidad inducidos por la vegetación, que intercepta y retiene las partículas con su tejido (Hernández, 2017)

En base a estos resultados, la especie *Chenopodium quinoa* es la más adecuada para ser ubicada en humedales artificiales, la siguiente especie con mejores características es la *Canna indica* debido a que tiene un gran potencial para remover contaminantes orgánicos y nutrientes en humedales artificiales con agua residual (Karungamy, 2022), y finalmente la especie que tiene menor eficiencia en la remoción de contaminantes es *Amaranthus spp.* (Figura 33).

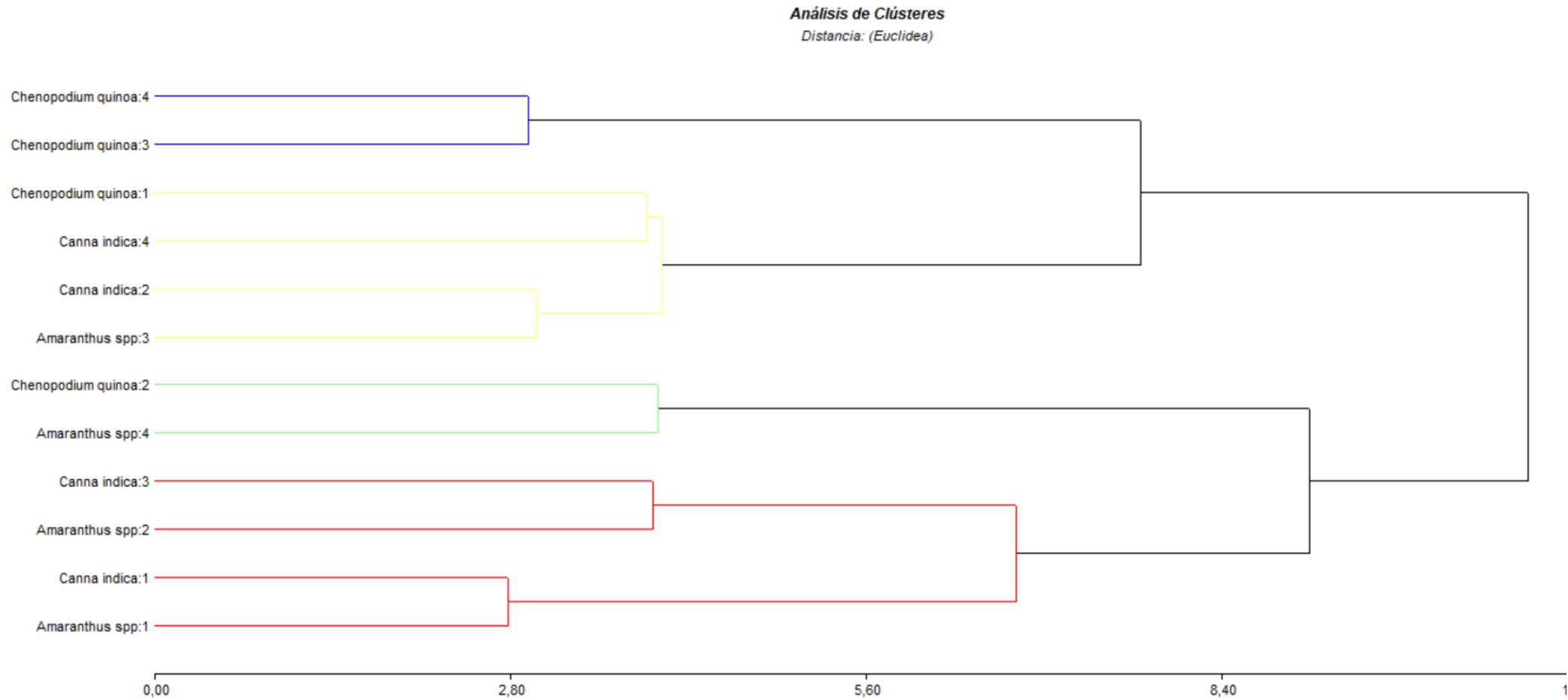


Figura 33: Grupos de tratamientos diferenciados mediante el análisis de conglomerados a nivel de indicadores de agua residual.

Fuente: Autor

4.3. Comparación de la respuesta de las especies sembradas en los HAFV bajo condiciones específicas de alimentación/descanso

Las horas de riego en los HAFV marcaron la variabilidad en el tiempo de los parámetros morfológicos de diámetro y área foliar como también la absorción de nutrientes como: N, P, K, Cu, Mg, y S de las plantas, estos resultados son también reportados por Dávila y López. (2020) quienes determinaron que las horas de riego influenciaron en el crecimiento de las especies, una mayor adaptación y presencia de un mejor desarrollo de los órganos vegetales.

En sus investigaciones, Basantes et al. (2015) muestra que la Quinua de la variedad Tunkahuan sembrada en condiciones normales tiene una capacidad de absorción similar al mismo cultivo sembrado en los HAFV, N (2,49%), P(0,36%), K (4,4%), Ca (1,51%), Mg (0,94%) y S(0,28%). Los resultados muestran que la Quinua cultivada en aguas residuales presenta un contenido de N (2,95%), P(0,38%), K (3,54%), Ca (0,94%), Mg (0,48%) y S(0,22%) (Tabla 16). Esto sugiere que el cultivo en aguas residuales mantiene los valores de nutrientes en rangos similares a los de un cultivo en condiciones normales, pero con una mayor absorción de nitrógeno y fósforo. Basantes y Terán (2017) en sus investigaciones realizadas en Pichincha, se reportaron los contenidos de N (3,50%), P(0,26%), K (5,28%), Ca (2,93%), Mg (1,4%) y S(0,28%) en *Amaranthus spp.* Nuestros resultados en la misma especie muestran que los contenidos de N (2,20%), P(0,24%), K (2,28%), Ca (1,87%), Mg (0,42%) y S(0,20%) (Tabla 16) fueron menores en comparación con los obtenidos en un ambiente normal. Sin embargo, es importante destacar que el *Amaranthus spp* cultivado en nuestros humedales artificiales alcanzó valores que presentan un rendimiento acorde al cultivo promedio, por su parte *Canna indica* obtuvo valores menores en los contenidos de N, P, K, Ca, Mg y S (Tabla 16).

Tabla 16: Promedios de nutrientes en el tejido vegetal, Prueba de Tukey

Elemento/Especie	<i>Amaranthus spp</i>	<i>Chenopodium quinoa</i>	<i>Canna indica</i>
N (%)	2,20 a b	2,95 a	1,78 b
P (%)	0,24 a	0,38 a	0,28 a
K (%)	2,28 b	3,54 a b	3,82 a
Ca(%)	1,87 a	0,94 b	2,04 a
Mg(%)	0,42 b	0,48 b	0,70 a
S(%)	0,20 a	0,22 a	0,21 a
B(ppm)	27,75 a	17 a	26,91 a
Zn(ppm)	35,25 a	35 a	23,16 a
Cu(ppm)	8,38 b	10,75 b	16,75 a
Fe(ppm)	1864,38 a	897,50 a	2300,81 a
Mn(ppm)	215,5 b	647 a	187,97 b

Fuente: Autor

Los autovalores resultantes del análisis de componentes principales (PCA) (ver Tabla 16). La primera componente principal tuvo un valor de Lambda de 214326,00, lo que representó el 100% de la varianza total. Las siguientes componentes principales tuvieron valores de Lambda mucho menores, lo que indica que explicaron menos varianza en los datos. En general, se observó que las primeras tres componentes principales explicaron la mayor parte de la varianza total en los datos (ver Tabla 17).

Tabla 17: Autovalores del Análisis de Componentes Principales (PCA)

Variables de clasificación: Tratamiento			
Autovalores			
Lambd a	Valor	Proporció n	Prop Acum
1	214326	1	1
2	10,93	5,10E-05	1
3	3,07	1,40E-05	1
4	0	0	1
5	0	0	1
6	0	0	1
7	0	0	1
8	0	0	1

9	0	0	1
10	0	0	1
11	0	0	1
12	0	0	1
13	0	0	1
14	0	0	1
15	0	0	1

Fuente: Autor

Los autovectores obtenidos a partir del PCA se presentan en la Tabla 18, en ella se observa que la primera componente principal se relacionó fuertemente con la variable "Horas de Riego" (Dávila y López, 2020), mientras que la segunda componente principal se relacionó principalmente con las variables "Diámetro tallo", "Área Foliar", "K (%)" y "Cu (ppm)". Se encontró que la tercera componente principal se relacionó principalmente con las variables "N (%)", "Mg (%)", y "S (%)" (Alarcón et al., 2018; Delgadillo et al., 2010).

Tabla 18: Autovectores de Variables de Clasificación: Tratamiento en el Análisis de Componentes Principales (PCA)"

Variables de clasificación: Tratamiento		
Autovectores		
Variables	e1	e2
Horas de Riego	1	0
Promedio Crecimiento	0	- 2,50 E-01
Diámetro tallo	0	3,00 E-01
Area Foliar	0	0,3
N (%)	0	0,26
P (%)	0	0,04
K (%)	0	0,3
CA(%)	0	- 0,25
Mg(%)	0	0,27
S(%)	0	0,27
B(ppm)	0	-0,3
Zn(ppm)	0	- 0,16
Cu(ppm)	0	0,3
Fe(ppm)	0	-0,3
Mn(ppm)	0	0,3

Fuente: Autor

4.3.1. Longitud de raíces

Los HAFV utilizan como medio de soporte un medio granular para percolar el agua, permitiendo el desarrollo de plantas que absorben agua a través de sus raíces, este órgano de la planta desempeña un papel importante en los humedales al convertir el carbono inorgánico en orgánico mediante la energía solar. Además, facilitan la transferencia de oxígeno desde la atmósfera hasta el medio, creando condiciones aerobias donde los microorganismos descomponen la materia orgánica y llevan a cabo la nitrificación. En la parte superior del humedal, donde hay más oxígeno, se forman colonias de microorganismos aerobios. (Ferreyra, 2020), de esta manera la importancia de la expansión de las raíces en los humedales artificiales es determinante debido a que permite la degradación de materia orgánica (Kurzbaum, 2022). Nuestros resultados del análisis de varianza ANOVA indicaron que hubo diferencias significativas en la longitud de las raíces de las especies HAFV con aguas residuales domésticas y sus respectivos HAFV con agua potable. En particular, se encontraron diferencias significativas para las especies *Amaranthus spp* y su HAFV con agua potable ($p < 0,05$), *Chenopodium quinoa* y su HAFV con agua potable ($p < 0,05$) y *Canna indica* y su HAFV con agua potable ($p < 0,05$) (Tabla 19).

Tabla 19: ANOVA ($p < 0,05$) de la longitud de las raíces en HAFV con agua residual y HAFV con agua potable.

Fuente de Variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F calculado	P valor
Bloques	320,92	3	106,97	2,02	0,2123
Tratamiento	266,67	2	133,33	2,52	0,1604
Error	317,33	6	52,89		
Total	904,92	11			

Fuente: Autor

Una vez analizados las diferencias de las raíces de cada una de las especies sembradas en los HAFV con aguas residuales y HAFV con agua potable, por consiguiente, se analizaron los resultados entre las raíces de *Amaranthus spp*, *Chenopodium quinoa* y *Canna indica* en HAFV con aguas residuales. Los resultados del ANOVA mostraron que el valor de p de 0,1604 y el valor de F de 2,52 . Esto indica que no hay diferencias significativas entre los tratamientos correspondiente a la longitud de raíces, a su vez en la prueba de Tukey todos los tratamientos tuvieron la misma letra (Figura 66) demostrando que los promedios de crecimiento son similares, estos resultados sugieren que los tres

tratamientos pueden ser igualmente efectivos en la producción de raíces en los HAFV irrigados con aguas residuales tratadas coincidiendo con los resultados de (Teixeira et al., 2018).

Tabla 20: ANOVA ($p < 0,05$) de la longitud de las raíces entre las 3 especies en HAVF alimentado con agua residual

Fuente de Variación	<i>Amaranthus spp.</i>		<i>Chenopodium quinoa</i>		<i>Canna indica</i>	
	F calculado	P valor	F calculado	P valor	F calculado	P valor
Bloques	4,40	0,1276	0,15	0,9259	0,61	0,6532
Tratamiento	11,11	0,0446	39,23	0,0082	42,09	0,0074

Fuente: Autor

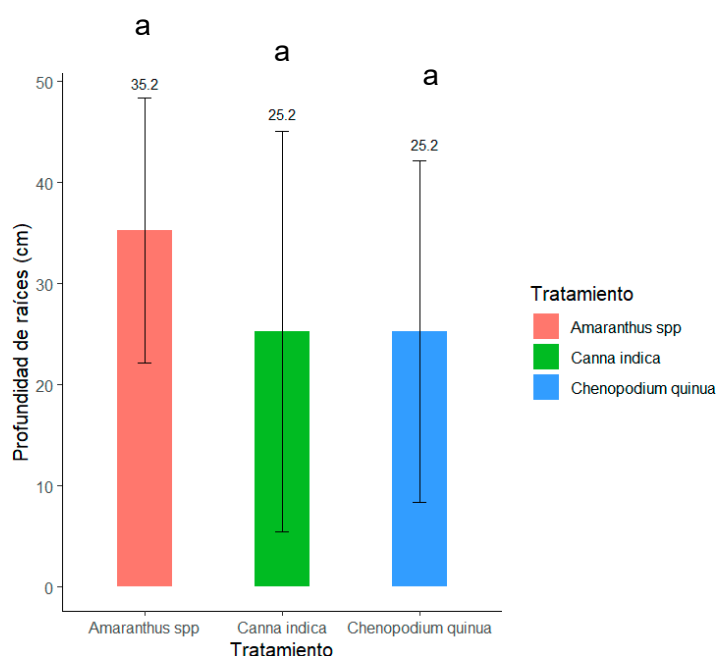


Figura 34 : Comparación de las medias de longitud de las raíces y prueba de Tukey

Fuente: Autor

4.3.2. Análisis de Peso seco, peso fresco y biomasa

Diferencias significativas en relación con el peso fresco (Tabla 20) de las plantas fueron encontradas. Los análisis de varianza ANOVA mostraron que los valores de p fueron inferiores a 0,05. Con relación al peso fresco, *Canna indica*, el cual obtuvo una media de 432 g según la prueba de Tukey, le siguió *Chenopodium quinoa*, mientras que *Amaranthus spp* obtuvo el menor peso fresco (Figura 35). En lo que se refiere a peso seco el tratamiento con *Canna indica* tuvo los mejores resultados (155,24 g) y fue significativamente diferente de todos los demás tratamientos (Figura 36). La prueba de Tukey mostró que el tratamiento de *Chenopodium quinoa* tuvo la mayor

media de biomasa (42,27 g) y fue significativamente diferente a los demás tratamientos, incluyendo su HAFV alimentados con agua potable (Figura 37).

La biomasa derivada del peso seco y fresco se observó que *Chenopodium quinoa* y *Canna indica* presentaron un mayor porcentaje, con 42,3 % y 36,9 %, respectivamente. Esto sugiere que estas especies acumulan una mayor cantidad de materia orgánica, y esto se deriva principalmente en la remoción de nitrógeno y fósforo (Alarcón et al., 2018) en comparación con *Amaranthus spp.* Estos hallazgos coinciden con el estudio de Vera et al. (2010), quienes destacan la importancia de la biomasa en la remoción de materia orgánica. En este sentido, nuestro estudio también confirma que la biomasa es un factor importante para el rendimiento agronómico de las plantas.

Tabla 21: ANOVA (p < 0,05) Peso fresco, Peso seco y Biomasa de las Especies Vegetales

Fuente de Variación	Peso Fresco		Peso Seco		Biomasa	
	F calculado	P valor	F calculado	P valor	F calculado	P valor
Bloques	1,50	0,2557	1,63	0,2251	1,25	0,3263
Tratamiento	58,64	<0,0001	201,30	<0,0001	96,77	<0,0001

Fuente: Autor

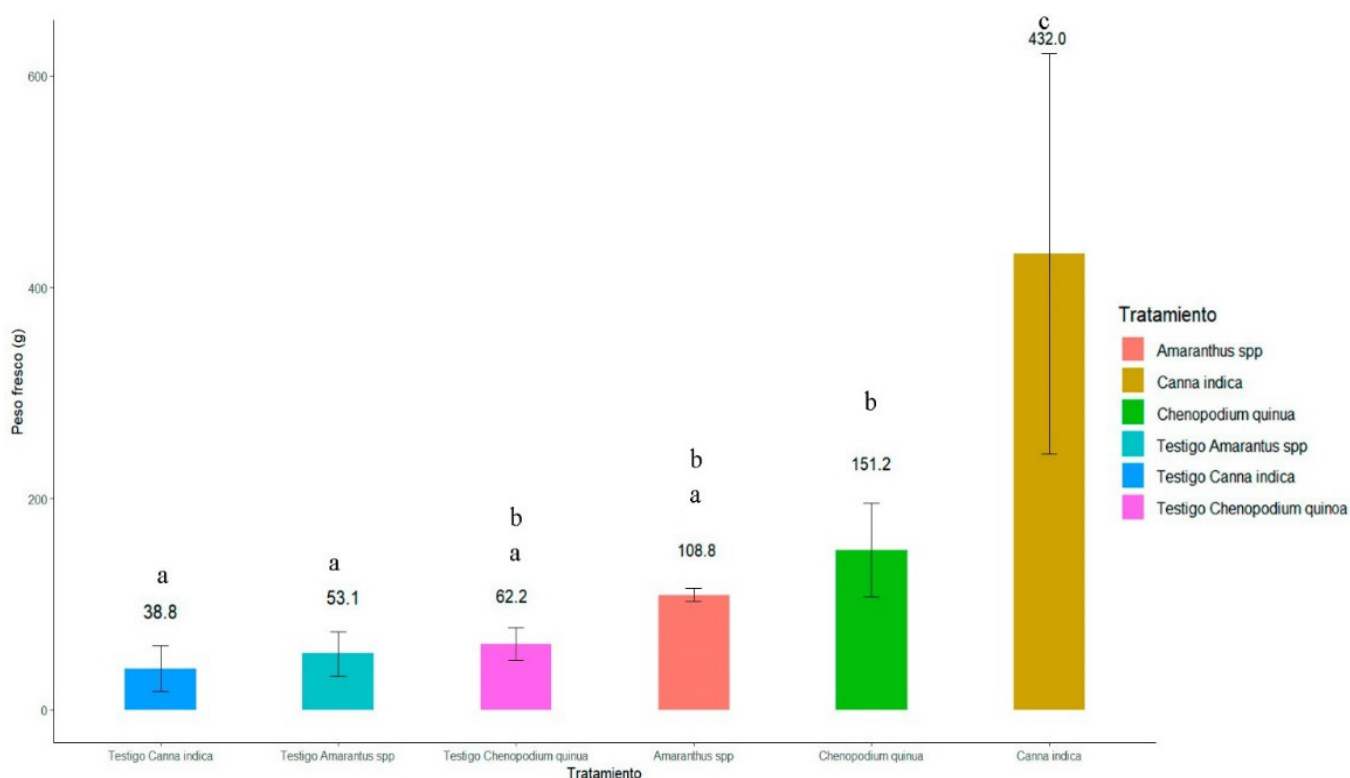


Figura 35: Peso fresco de las especies en HAFV con aguas residuales y sus testigos

Fuente: Autor

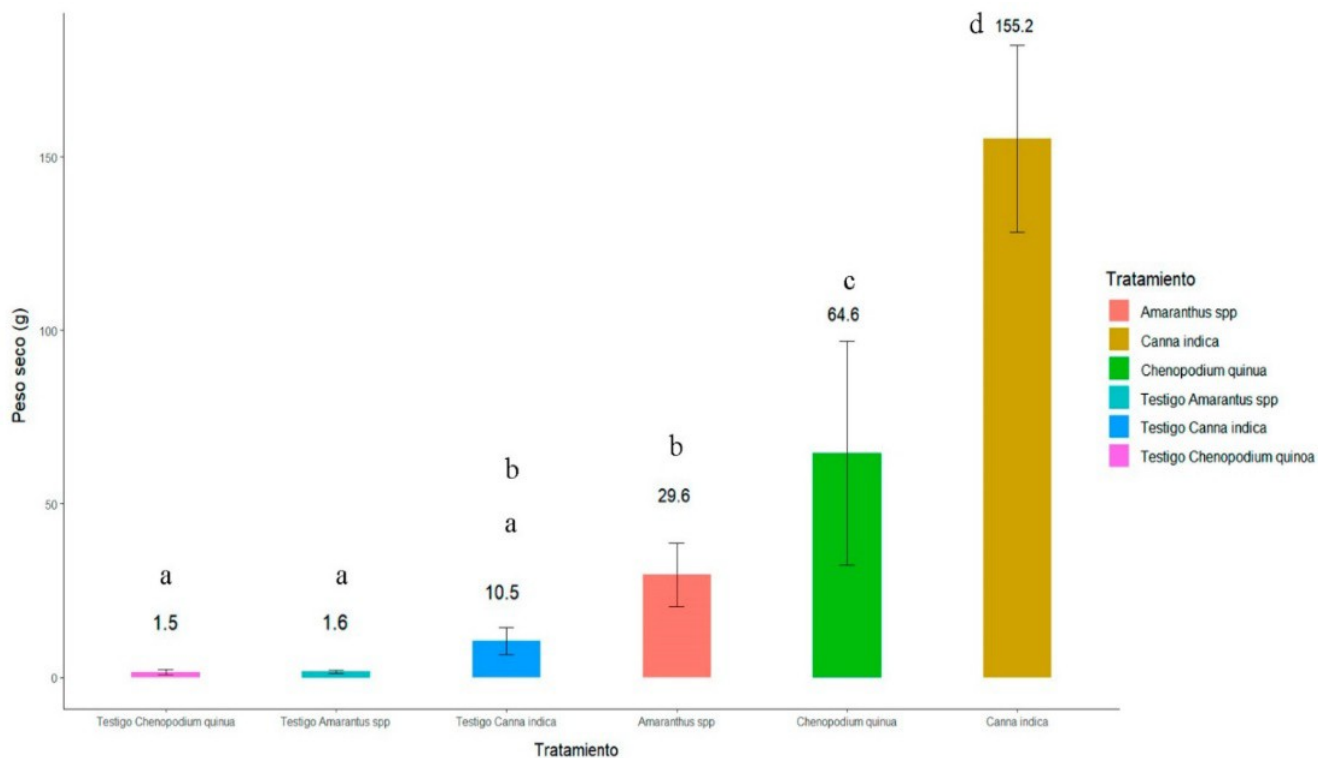


Figura 36: Peso seco de las especies en HAFV con aguas residuales y sus testigos

Fuente: Autor

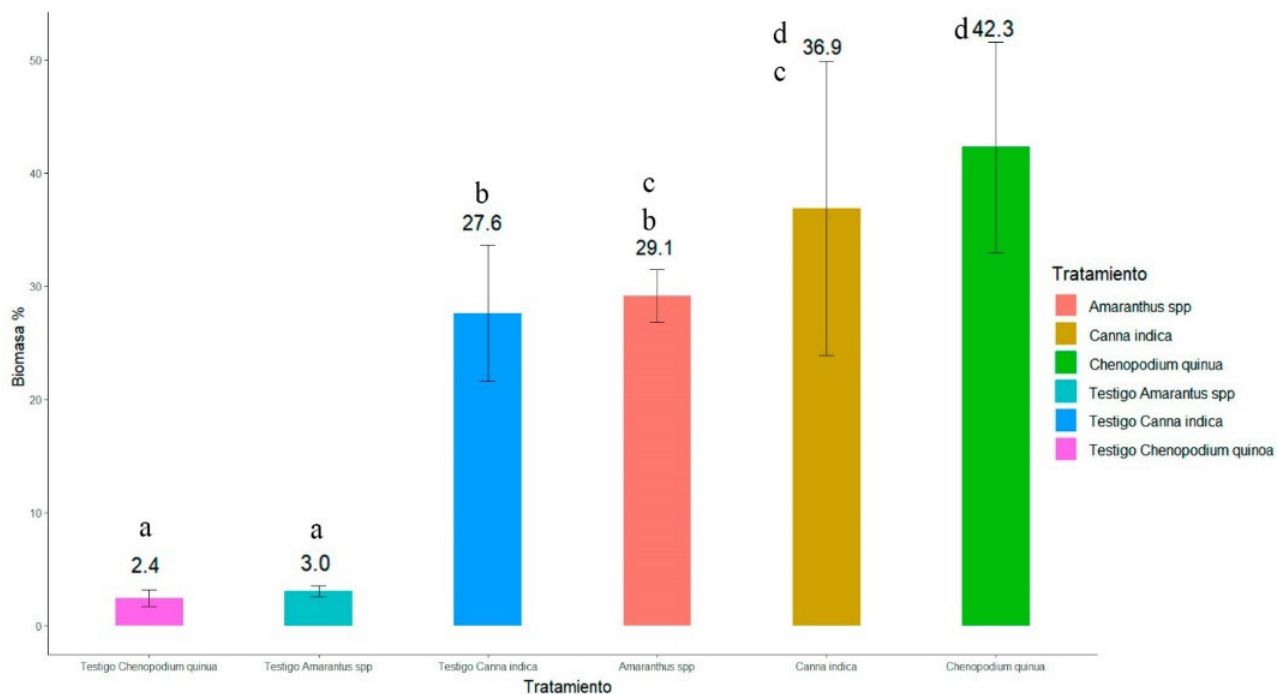


Figura 37: Biomasa de las especies en HAFV con aguas residuales y sus testigos.

Fuente: Autor

4.3.3. Interrelación de las especies con la remoción de la DBO y DQO en las distintas fases vegetativas

La remoción de la DBO y la DQO en las especies que se encuentran en los HAFV alimentados con agua residual se encuentran en una distribución normal acorde a las pruebas de normalidad y homocedasticidad, $p > 0,05$ (Tabla 22)

Tabla 22: Pruebas de normalidad y homocedasticidad de la respuesta de las especies vegetales ante la remoción de DBO y DQO

Especies	Normalidad		Homocedasticidad
	W*	Shapiro-Wilks	Levene
<i>Amaranthus spp</i>	0,89	0,196 5	>0,99
<i>Chenopodium quinoa</i>	0,95	0,706 0	>0,99
<i>Canna indica</i>	0,95	0,707 3	>0,99

Fuente: Autor

En el análisis del agua residual tratada con las tres especies de plantas, se observaron diferencias significativas en los índices de DBO y DQO en cada una de sus fases (Tabla 22). Específicamente, en la fase vegetativa de cada especie, se registró una disminución en las concentraciones de DBO en el tratamiento del agua residual en los humedales artificiales, lo que indica una respuesta positiva de las plantas para reducir la materia orgánica biodegradable presente en el agua. Esto representa un beneficio para el uso posterior del agua tratada. *Canna indica* fue la especie que mostró una mayor reducción en esta fase, con un promedio de 13,14 mg/L (Figura 38).

Durante las etapas finales de la fase reproductiva de las tres especies vegetales, se observó un aumento significativo en los valores de DBO en el efluente. Este fenómeno se debe al proceso de maduración de las plantas, las mismas que aportan una mayor cantidad de materia orgánica al medio ambiente (caída de hojas y demás restos vegetales que se descomponen aumento los índices de parámetro). En consecuencia, esta etapa vegetativa no es favorable para el tratamiento de aguas residuales.

En cuanto a la DQO, se ha observado que la capacidad de las especies vegetales para reducir esta variable es mayor durante la fase reproductiva y en las etapas finales de su ciclo de vida. En particular, se ha encontrado que el HAFV con la especie *Chenopodium quinoa* es la que más contribuye a la reducción de la DQO, (Figura 39), razón por lo que se justificaría su uso en sistemas de fitorremediación de aguas residuales.

UCUENCA

Estas informaciones presentadas sugieren que estas especies pueden ser utilizadas para el tratamiento de aguas residuales durante esta fase específica, ubicando a estas especies como potenciales removedores de DBO y DQO, Alarcón et al. (2018) determinó que las especies vegetales que tienen índices de remoción del 60 % en adelante pueden ser consideradas para tales fines.

Tabla 23: ANOVA ($p < 0,05$) DBO y DQO de las especies vegetales en las distintas etapas fenológicas

Fuente de Variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F calculado	P valor
Bloques	357,32	3	119,11	0,92	0,4873
Fases fenológicas	9829,40	2	4914,70	37,82	0,0004
Error	779,71	6	129,95		
Total	10966,43	11			

Fuente: Autor

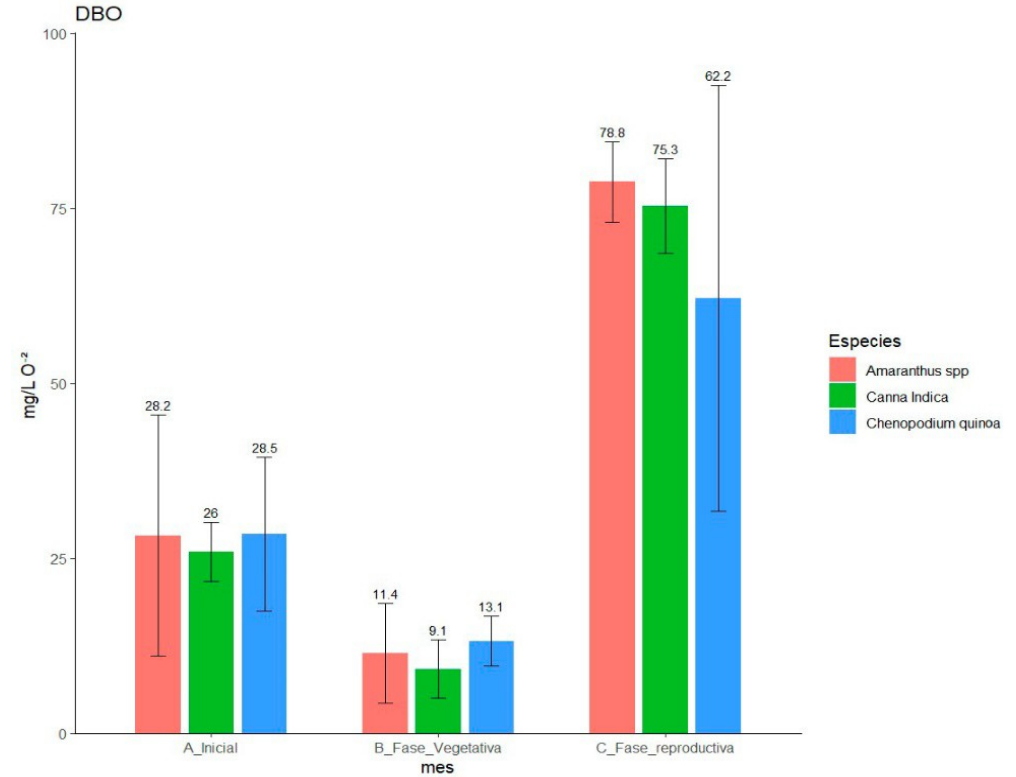


Figura 38: Respuesta de las especies vegetales al DBO en aguas residuales

Fuente: Autor

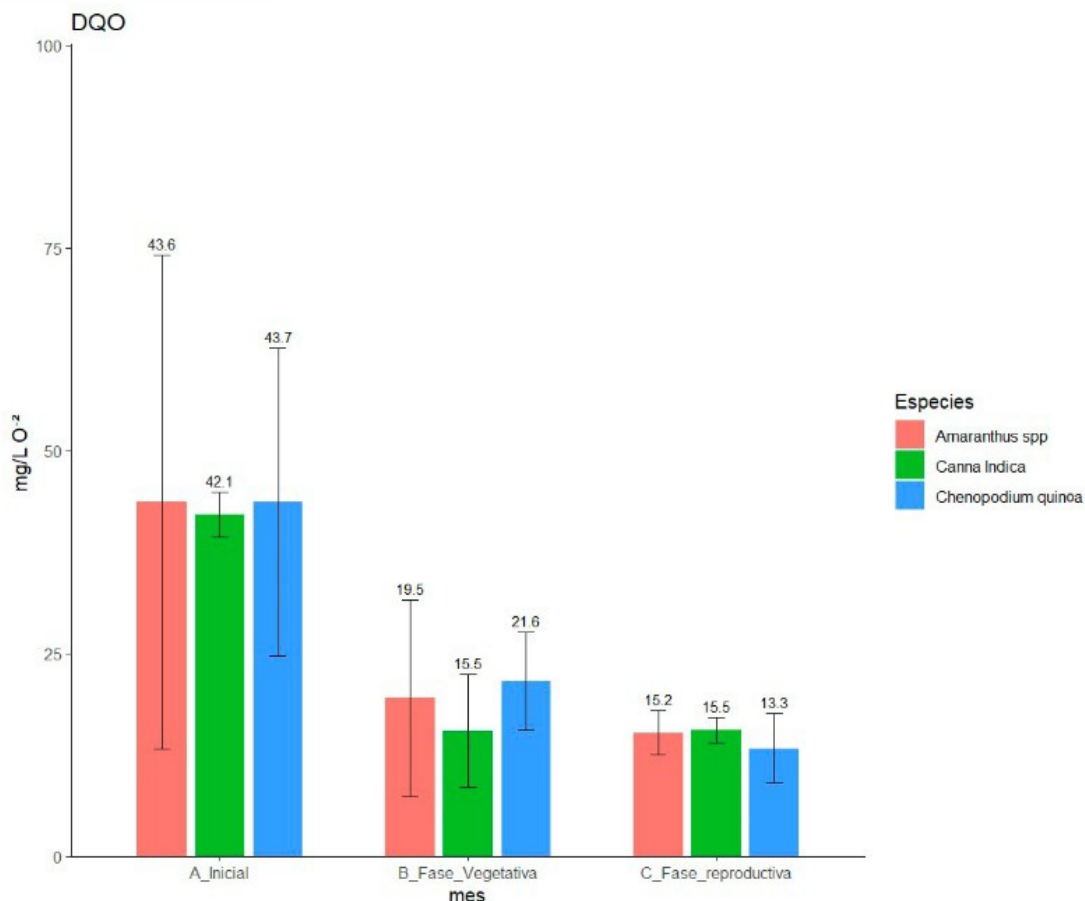


Figura 39: *Respuesta de las especies vegetales al DQO en aguas residuales*

Fuente: Autor

Durante las dos fases de análisis de los efluentes de los humedales artificiales con las tres especies vegetales, se pudo observar que la fase vegetativa mostró niveles bajos de indicadores de contaminación del agua. Esto coincide con los hallazgos de otros estudios, quienes también encontraron una disminución en los valores durante las fases vegetativas de las plantas analizadas. En general, este estudio sugiere que la utilización de humedales artificiales de flujo vertical con especies agrícolas puede ser una opción viable y sostenible para el tratamiento de aguas residuales y obtener beneficios agrícolas.

Conclusiones

En el presente estudio y posteriormente a la evaluación de especies vegetales nativas como opción a implementar en humedales artificiales construidos de flujo vertical utilizados para el tratamiento aguas residuales pueden arribarse a las siguientes conclusiones.

- Incorporar estas tres especies agrícolas en los sistemas de HAFV permitiría un doble aprovechamiento en el tratamiento de aguas residuales, ya que se podría utilizar el agua tratada para el riego de estas plantas, generando así una producción adicional.
- Este estudio demostró que las plantas cultivadas en humedales artificiales de flujo vertical asemejaron a los cultivos tradicionales y sobrevivieron y soportaron el estrés al que fueron sometidas. En cuanto a las variables morfológicas, se observó que todas las plantas en los humedales artificiales continuaron con sus etapas fenológicas hasta la maduración de la panoja o la floración, según la especie. Además, se encontró que las plantas de quinua y achira presentaron una mayor área foliar en los humedales artificiales con aguas residuales que en los cultivos tradicionales, lo que sugiere que estas plantas aprovecharon eficientemente los nutrientes y la materia orgánica presentes en las aguas residuales.
- Las plantas cultivadas en humedales artificiales de flujo vertical asemejaron a los cultivos tradicionales y sobrevivieron y soportaron el estrés al que fueron sometidas, permitiendo su uso en estos sistemas regados con agua residual previamente tratada, generando así posibilidades de aumentar el nivel productivo y potencializar la economía circular.
- El crecimiento de las especies *Amaranthus spp.*, *Chenopodium quinoa* y *Canna indica* en los Humedales Artificiales de Flujo Vertical irrigados con aguas residuales fue significativamente diferente a los controles que recibieron irrigación con agua potable. Las plantas aprovecharon los nutrientes inorgánicos del agua residual, verificándose una adecuada adaptación de estas a un medio completamente inerte, y tienen la capacidad de reducir la DBO y DQO.
- Las variables morfológicas estudiadas fueron debidamente corroboradas permitiendo sus análisis en las diferentes etapas fenológicas hasta la maduración de la panoja o la floración.
- La fase fenológica vegetativa mostró mejores remociones de parámetros tales como: sólidos disueltos totales (SDT), conductividad eléctrica (CE), carbono orgánico total (COT), nitrógeno (N), fósforo reactivo (como lo colocan ustedes) y demanda bioquímica de oxígeno (DBO).
- Plantas como la Quinua y Achira presentaron una mayor área foliar que el Ataco en

los humedales artificiales alimentados con aguas residuales que, en los cultivos tradicionales, esto sugiere que estas plantas aprovecharon eficientemente los nutrientes y la materia orgánica presentes en las aguas residuales.

- En cuanto a los macroelementos el contenido de nitrógeno (N) en las plantas fue similar en *Amaranthus spp* y *Chenopodium quinoa*, no siendo así en *Canna indica*, la cual reportó menores concentraciones. *Chenopodium quinoa* presentó la concentración más alta de fósforo (P) y magnesio (Mg), mientras que *Canna indica* tuvo la más alta de potasio (K) y calcio (Ca).
- El análisis a los microelementos evidenció que los niveles de azufre (S) fueron similares en las tres especies. *Canna indica* presentó las concentraciones más altas de hierro (Fe) y zinc (Zn), mientras que *Amaranthus spp* tuvo la concentración más alta de boro (B). Los niveles de cobre (Cu) fueron similares en *Chenopodium quinoa* y *Canna indica*, pero más bajos en *Amaranthus spp*.
- *Canna indica* sembrada en humedales artificiales de flujo vertical con aguas residuales fue el más efectivo en cuanto al peso fresco y seco, mientras que el tratamiento de *Chenopodium quinoa* presentó la mayor media de biomasa. Por otro lado, *Amaranthus spp* obtuvo los menores valores en las tres variables de peso, aunque tuvo diferencias significativas con los HAFV con agua potable.
- No se encontraron diferencias significativas en la longitud de las raíces, lo que indica una exitosa colonización de las raíces de las tres especies en los HAFV alimentados con agua residual, permitiendo una adecuada concentración de oxígeno en la matriz de los humedales, aspecto crucial para el desarrollo de las especies y remoción de contaminantes.

Recomendaciones

Finalmente, luego de plantear las conclusiones y analizar posibles investigaciones futuras se presentan las siguientes recomendaciones.

- Realizar un estudio en base a parámetros de agua y tejido vegetal estudiados, dosis de fertilización química y establecer comparaciones con irrigación con aguas residuales tratadas.
- Profundizar el estudio de estas especies en humedales artificiales en cuanto al rendimiento del grano de *Amaranthus spp* y *Chenopodium quinoa* con respecto a cultivos convencionales, rendimiento Kg/ha.
- Profundizar en estudios con estas especies de plantas en sistemas de humedales artificiales de flujo horizontal, estos conllevan otra dinámica en la remoción de contaminantes y parámetros operaciones.

Referencias

- Aguilar, A., Valdez, J. B., Valdez, C., León, J. I., Betancourt, M., & Osuna, T. (2017). Carbono orgánico total como parámetro de calidad del agua. *Tecnología y ciencias del agua*, 08(4), 79–99. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2017-04-05>
- Alarcón, M., Zurita, F., Lara, J., & Vidal, G. (2018). *Humedales de tratamiento: Alternativa de saneamiento de aguas residuales aplicable en América Latina*. Pontificia Universidad Javeriana.
- Basantes, E., & Terán, D. (2017). Efecto de la fertilización nitrogenada en el contenido proteico y pigmentos de Amarantho (*Amaranthus caudatus* L). *Vínculos, ESPE*, 2(1).
- Carrillo, J. (2014). *Determinación de los requerimientos de riego del cultivo de la achira (Canna edulis, Ker Gawier; Canna inidica, L) y sus estadios fenológicos, con riego por aspersión, en el sector Cabrería-Chumberos, perteneciente al sistema de riego Palmira* [Magister de Riego]. Universidad Nacional de Loja.
- Caselles, A., Mendoza, G., Simanca, M., Romero, I. M., & Eslava Eljash, P. (2018). Tomato (*Lycopersicum sculentum*) production in sub surface flow constructed wetlands for domestic wastewater treatment in rural a colombian community. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 19(4), 1–10. <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2018.19n4.038>
- Cisneros, C., Montes Rojas, C., Burbano Catuche, G. A., Muñoz Certuche, E. F., & Calderón Yonda, Y. (2018). Descripción del ciclo fenológico de cuatro ecotipos de (*chenopodium quinoa willd.*), en Puracé – Cauca, Colombia. *Biotechnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 16(2), 26. [https://doi.org/10.18684/BSAA\(16\)26-37](https://doi.org/10.18684/BSAA(16)26-37)
- Dávila, M., & López, E. (2020). *Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas mediante Humedales Construidos de Flujo Subsuperficial Vertical utilizando diferentes Plantas Emergentes* [Pregrado]. Universidad del Azuay.
- de León González, F., Payan Zelaya, F., Pérez Jerónimo, G., Nava Rodríguez, V., & Aime, M. A. (1997). AREA FOLIAR, LONGITUD DE RAICES Y PRODUCCION DE GRANO DE *Amaranthus hypocondriacus* L. EN UN SUELO COMPACTADO. *Agro Sur*, 25(2), 170–179. <https://doi.org/10.4206/agrosur.1997.v25n2-05>
- Delgadillo, O., Camacho, A., Pérez, L., & Andrade, M. (2010). *Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales*. Centro Andino para la Gestión y Uso del Agua (Centro AGUA).
- El Yousfi, L., Choukr-Allah, R., Zaafrani, M., Hirich, A., Fahmi, H., Abdelatif, R., Laajaj, K., & El Omari, H. (2015). *Impact of use of treated wastewater for irrigation on soil and quinoa crop in South of Morocco*. 15807.

- El Youssfi, L., Choukr-Allah, R., Zaafrani, M., Mediouni, T., Ba Samba, M., & Hirich, A. (2012). Effect of Domestic Treated Wastewater use on Three Varieties of Quinoa (*Chenopodium quinoa*) under Semi Arid Conditions. *International Journal of Environmental and Ecological Engineering*, 6(8), 4.
- El Youssfi, L., Choukr-Allah, R., Zaafrani, M., Mediouni, T., Sarr, F., & Hirich, A. (2012). Effect of Domestic Treated Wastewater use on Three Varieties of Amaranth (*Amaranthus* spp.) under Semi Arid Conditions. *International Journal of Environmental and Ecological Engineering*, 6(2).
- Espitia, R., Sesma, L. F., Valverde, M. G., González, L., Escobedo, D., & Aguilar, M. J. (2021). *Tiene el amaranto el potencial agronómico para ser un fenómeno mundial como la quinua*. 12.
- Ferreira, J. (2020). *Medios de soporte alternativos para mejorar la eficiencia de los humedales artificiales de flujo subsuperficial, en el estado de Michoacán* [Maestría]. UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO.
- Guerrero, N. R., & Quintero, M. A. O. (2012). *Determinación del Área Foliar en Fotografías Tomadas con una Cámara Web, un Teléfono Celular o una Cámara Semiprofesional*. 65.
- Hernández, W. (2017). *TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EMPLEANDO LAS ESPECIES ACHIRA (Canna indica) Y CARRIZO (Pragmites australis) A TRAVÉS DE HUMEDALES ARTIFICIALES, CHALAMARCA 2017* [Pregrado]. Universidad César Vallejo.
- Hirich, A., Allah, R. C., Jacobsen, S. E., El, L., & Omari, H. E. (2012). *Using deficit irrigation with treated wastewater in the production of quinoa (Chenopodium quinoa Willd.*
- Illescas, J. (2017). *ESTUDIO FENOLÓGICO DE DOS VARIEDADES DE AMARANTO EN LAS CONDICIONES AGROMETEREOLÓGICAS DE QUEROCHACA*. Universidad Técnica de Ambato.
- INIAP. (2021). *Análisis químico y físico en muestras de suelos, plantas y aguas. – Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias*. <https://www.iniap.gob.ec/servicio-1/>
- Jaramillo, M., & Restrepo, I. (2017). Wastewater Reuse in Agriculture: A Review about Its Limitations and Benefits. *Sustainability*, 9(10), 1734. <https://doi.org/10.3390/su9101734>
- Jiménez, E. V. J. (2017). *CARACTERIZACIÓN MORFOLÓGICA, FÍSICA Y FENOLOGÍA DE CUATRO VARIEDADES DE AMARANTO (Amaranthus sp.) PARA LAS CONDICIONES METEOROLÓGICAS DEL CANTÓN CEVALLOS* [Grado]. Universidad Técnica de Ambato.
- Karungamy, P. N. (2022). Potential of *Canna indica* in Constructed Wetlands for

- Wastewater Treatment: A Review. *Conservation*, 2(3), Article 3. <https://doi.org/10.3390/conservation2030034>
- Kurzbaum, E. (2022). The Partial Contribution of Constructed Wetland Components (Roots, Gravel, Microorganisms) in the Removal of Phenols: A Mini Review. *Water*, 14(4), 626. <https://doi.org/10.3390/w14040626>
- Lituma, E. (2016). *DISEÑO Y ELABORACIÓN DE UN MANUAL DE TOMA, MANEJO Y RECEPCIÓN DE MUESTRAS DE AGUA PARA EL LABORATORIO DE CALIDAD DE AGUA DEL DEPARTAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS Y CIENCIAS AMBIENTALES, PERTENECIENTE A LA UNIVERSIDAD DE CUENCA* [Grado]. Universida de Cuenca.
- Lobo, M., Medina, C. I., Grisales, J. D., Yepes, A. F., & Álvarez, J. A. (2016). Caracterización y evaluación morfológicas de la colección colombiana de achira, *Canna edulis* Ker Gawl. (Cannaceae). *Corpoica Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 18(1), 47. https://doi.org/10.21930/rcta.vol18_num1_art:558
- Magwaza, S. T., Magwaza, L. S., Odindo, A. O., Mditshwa, A., & Buckley, C. (2020). Partially treated domestic wastewater as a nutrient source for tomatoes (*Lycopersicum solanum*) grown in a hydroponic system: Effect on nutrient absorption and yield. *Heliyon*, 6(12), e05745. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05745>
- Ministerio del Ambiente. (2017). *TEXTO UNIFICADO DE LEGISLACION SECUNDARIA DE MEDIO AMBIENTE*. <https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2018/05/TULSMA.pdf>
- Monroy, D., Martínez, J. de J., Gavi, F., Torres, M., & Hernández, I. (2021). Crecimiento, acumulación y distribución de materia seca en dos variedades de amaranto (*Amaranthus hypochondriacus* y *A. cruentus*) bajo fertigación. *Biotecnia*, 23(3). <https://doi.org/10.18633/biotecnia.v23i3.1399>
- Mousavi, S. R., & Shahsavari, M. (2014). Effects of Treated Municipal Wastewater on Growth and Yield of Maize. *Biological Forum – An International Journal*, 6.
- Ngwenya, M., Gadaga, T., & Kunene, E. (2023). *Effects of Organic and Inorganic Fertilizers on the Mineral and Protein Content of Amaranth (Amaranthus Hybridus)* [Preprint]. SSRN. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4389274>
- Oviedo, M. O. D. S., Casuriaga, O. L. C., López, E. M., Niz, A. I. S., Avalos, D. F. L., Ocampo, F. D. V., & Pereira, W. D. L. (2022). Fertilización fosfatada y su influencia en caracteres agronómicos del maíz cultivado sobre mucuna ceniza (*Mucuna pruriens*) incorporada y en cobertura del suelo. *Siembra*, 9(2), Article 2. <https://doi.org/10.29166/siembra.v9i2.3793>

- Pazán Toledo, A. E., & Gárate Correa, D. E. (2022). *Puesta en marcha de un humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal como tratamiento secundario a la primera etapa del Sistema Francés* [MasterThesis, Universidad del Azuay]. <http://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/12454>
- Peña, N. Q., & Cely, C. R. C. (2011). Comparación de técnicas experimentales para la medición del crecimiento vegetal. *Revista Nacional de Investigación - Memorias*, 14.
- Peralta, E., Villacrés, E., Mazón, N., Rivera M., M., & Subía G., C. (2008). *El ataco, sangorache o amaranto negro (Amaranthus hybridus L.) en Ecuador*. <http://repositorio.iniap.gob.ec/handle/41000/2710>
- Pinninti, R., Kasi, V., Sallangi, L. K. S. V. P., Landa, S. R., Rathinasamy, M., Sangamreddi, C., & Dandu Radha, P. R. (2022). Performance of Canna Indica based microscale vertical flow constructed wetland under tropical conditions for domestic wastewater treatment. *International Journal of Phytoremediation*, 24(7), 684–694. <https://doi.org/10.1080/15226514.2021.1962800>
- Prashad, J. (2020, julio 28). La crisis de la contaminación del agua de América Latina y sus efectos en la salud de los niños. *Humanium*. <https://www.humanium.org/es/la-crisis-de-la-contaminacion-del-agua-de-america-latina-y-sus-efectos-en-la-salud-de-los-ninos/>
- Sharma, A., Gajbhiye, S., Chauhan, S., & Chhabra, M. (2021). Effect of cathodic culture on wastewater treatment and power generation in a photosynthetic sediment microbial fuel cell (SMFC): Canna indica v/s Chlorella vulgaris. *Bioresource Technology*, 340, 125645. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125645>
- Teixeira, D. L., Matos, A. T. D., Pimentel De Matos, M., Vieira, D. P., Araújo, E. D., & Ferraz, L. A. (2018). The influence of plant roots on the clogging process and the extractive capacity of nutrients/pollutants in horizontal subsurface flow constructed wetlands. *Ecological Engineering*, 120, 54–60. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.05.031>
- UNESCO. (2019). *Informe Mundial de Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2019: No dejar a nadie atrás*. UN. <https://doi.org/10.18356/e96937a1-es>
- Vymazal, J., & Kröpfelová, L. (2008). *Wastewater Treatment in Constructed Wetlands with Horizontal Sub-Surface Flow* (Vol. 14). Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8580-2>
- Zhang, Z., Rengel, Z., & Meney, K. (2007). Nutrient Removal from Simulated Wastewater Using Canna indica and Schoenoplectus validus in Mono- and Mixed-Culture in Wetland Microcosms. *Water, Air, and Soil Pollution*, 183(1–4), 95–105. <https://doi.org/10.1007/s11270-007-9359-3>

Anexos

Anexo A: Protocolo para la toma de muestras de agua residual para los análisis de laboratorio

1. Ubicar botellas de 1 litro limpias
2. Tomar las muestras de los desagües entre los horarios de las 9 am a las 10 am
3. Llenar al tope las botellas con agua residual, para los análisis de DBO a los 5 días
4. Llevar al laboratorio con el etiquetado correspondiente.



Figura 40: *Toma de muestras de agua de los HAFV con agua residual*

Fuente: Autor

Anexo B: Método para la determinación del área foliar



Figura 41: Imagen escaneada de las hojas de *Canna indica* con el patrón métrico

Fuente:
Autor



Figura 42: Imagen escaneada de las hojas de *Amaranthus* spp. con el patrón métrico

Fuente:
Autor

Anexo C: Resultados y procesos del análisis de agua en la etapa vegetativa y reproductiva de las especies en los HAFV

Tabla 24: Análisis de agua de los HAFV con agua residual en la etapa vegetativa

	Parámetro	Valor hallado												Unidades	PROCEDIMIENTOS SEGUIDOS EN MS
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
1	pH	5,58	5,53	5,56	5,6	5,22	5,28	6,53	6,35	6,36	6,56	6,7	6,87	unidades	MNE 2320-B
2	Turbiedad	8	20,5	17	21	15	10	5	15	22	40	25	15	UNT	MNE 2130-B
3	Sólidos disueltos totales	198	174	176,4	179,1	176	181	83	196	175	198	187	115	mg/L	MNE 2540-C
4	Conductividad	89	78,3	79,38	80,6	79,2	81,45	42	88	78,75	89,1	84,2	52	uS/cm	MNE 2540-C
5	Oxígeno Disuelto OD	7,31	7,6	6,3	6,8	7,4	7,3	7,2	7,5	6,4	7,4	6,1	6,8	mg/L	MNE 4500-C
6	Carbono Org., total	7	11	16	7,4	11,1	6,8	6,5	10,1	14,22	6,8	11,2	6,56	mg/L	
7	Nitrógeno total	1,96	3,61	2,48	3,85	2,75	1,31	1,75	2,52	2,2	3,42	2,65	2,01	mg/L	MNE 4500-B
8	Nitritos	0,11	0,1	0,09	0,1	0,14	0,11	0,09	0,1	0,07	0,1	0,13	0,11	mg/L	MNE 4500-B
9	Nitratos	0,7	1,8	0,6	1,1	2	0,6	0,6	1,3	1,05	1,12	2,1	1,8	mg/L	MNE 4500-B
10	Nitrógeno amoniacal	1,18	1,11	1,19	1,21	0,01	0	1,08	1,12	1,11	1,31	0,07	0,1	mg/L	MNE 4500-B
11	Fósforo libre o reactivo	0,55	0,68	0,58	0,71	0,41	0,52	0,45	0,58	0,56	0,7	0,4	0,52	mg/L	MNE 3500-D
12	Fósforo total	3,7	4,5	3,73	4,73	2,73	3,5	3,2	3,62	3,69	4,5	2,63	3,3	mg/L	MNE 3500-D

13	Demanda Bioquímica de Oxígeno	5,85	18,3	18,0 6	13,0 2	8,39	3,63	13,2	11,5 2	11,3 4	9,96	4,8	16,8	mg/L	MNE 5210-A
14	Demanda química de oxígeno	9,75	31,8	30,1	21,8 4	14,3	6,1	21,6	19,6	18,1	16,6	8,3	28	mg/L	MNE 5220-D
15	Coliformes totales	5,2x 10 ⁵	4,8x 10 ⁵	1,1x 10 ⁵	6,4x 10 ⁴	5,2x 10 ⁵	3,4x 10 ⁵	2,1x 10 ⁵	4,3x 10 ⁵	2,1x 10 ⁵	6,4x1 0 ⁴	5,4x1 0 ⁵	4,4x10 ⁵	NMP/10 0ml	NTE/INEN

Fuente: Laboratorio de Aguas y Suelos Facultad de Ciencias Químicas Campus Balzay de la Universidad de Cuenca

Tabla 25: Análisis de agua de los HAFV con agua residual en la etapa reproductiva

	Parámetro	Valor hallado												Unidades	PROCEDIMIENTOS SEGUIDOS EN MS
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
1	pH	6,17	6,65	6,84	7,06	7,15 8	7,26 9	5,6	6,1	6,5	6,7	6,7	6,8	unidades	MNE 2320-B
2	Turbiedad	19,4	11,8	12,7	11,8	10,4	12,2	10	15	15	15	10	10	UNT	MNE 2130-B
3	Sólidos disueltos totales	268	271	260	268	220	235	240	189	200	192	205	231	mg/L	MNE 2540-C
4	Conductividad	542	532	484	536	510	536	132	103, 95	110	105,6	112,7 5	127,05	uS/cm	MNE 2540-C
5	Oxígeno Disuelto OD	6	5,7	5,8	6,1	5,9	6	7,2	7,6	6,4	7	7,6	7,8	mg/L	MNE 4500-C

6	Carbono Org., total	19,5	20	18,7	19,2	20,1	18	20,6	20,9	17,8	19,8	20,2	17,2	mg/L	
7	Nitrógeno total	1,68	1,01	8	2	4	1	2	6	0,8	2,815	0,815	0,718	mg/L	MNE 4500-B
8	Nitritos	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,09	0,11	0,02				mg /L	MNE 4500-B
9	Nitratos	0,7	0,3	1,05	1,12	2,1	1,8	0,2	0,4	0,4	1,1	0,3	0,7	mg /L	MNE 4500-B
10	Nitrógeno amoniacal	1,62	1,71	1,01	1,45	0	0	1,62	1,71	1,01	1,45	0	0	mg/L	MNE 4500-B
11	Fósforo libre o reactivo	0,76	1,09	1,16	0,89	0,26	0,66	0,76	1,09	1,16	0,89	0,26	0,66	mg/L	MNE 3500-D
12	Fósforo total	0,4	0,36	0,47	0,51	0,46	0,32	3,4	4,5	3,9	4,7	2,1	3,8	mg/L	MNE 3500-D
13	Demanda Bioquímica de Oxígeno	81,2	79,2											mg/L	MNE 5210-A
14	Demanda química de oxígeno	16,3					11,2	17,0						mg/L	MNE 5220-D
15	Coliformes totales	1,2x10 ⁴	1,8x10 ⁴	1,6x10 ⁴	3,3X10 ³	2,2X10 ³	1,4X10 ³	3,2x10 ⁴	2,8x10 ⁴	1,1x10 ⁴	5,3X10 ³	2,2x10 ⁴	3,4X10 ³	NMP/100 ml	NTE/INEN

Fuente: Autor

Anexo D: Análisis vegetales.

Tabla 26: Análisis de los nutrientes disponibles en los vegetales en la fase reproductiva de las especies vegetales.

Tratamiento	Bloques	N (%)	P (%)	K (%)	Ca(%)	Mg(%)	S(%)	B(ppm)	Zn(ppm)	Cu(ppm)	Fe(ppm)	Mn(ppm)
<i>Amaranthus spp</i>	1	2,27	0,23	1,81	2	0,47	0,2	21	51	14	3886	292
<i>Amaranthus spp</i>	2	2,15	0,25	2,64	1,77	0,38	0,21	33	23	4	292	156
<i>Amaranthus spp</i>	3	2,21	0,24	2,22	1,88	0,42	0,2	27	37	9	2089	224

<i>Amaranthus spp</i>	4	2,18	0,24	2,43	1,82	0,4	0,2	30	30	6,5	1190,5	190
Testigo <i>Amaranthus spp</i>	1	2,31	0,42	2,09	1,15	0,35	0,19	22	41	10	2601	225
Testigo <i>Amaranthus spp</i>	2	2,81	0,51	2,72	1,48	0,52	0,2	36	41	7	1738	281
Testigo <i>Amaranthus spp</i>	3	2,56	0,46	2,4	1,31	0,43	0,19	29	41	8,5	2169,5	253
Testigo <i>Amaranthus spp</i>	4	2,68	0,48	2,56	1,39	0,47	0,19	32,5	41	7,75	1953,75	267
<i>Chenopodium quinoa</i>	1	2,24	0,4	3,56	0,83	0,56	0,21	13	41	10	839	621
<i>Chenopodium quinoa</i>	2	2,55	0,27	2,74	0,74	0,35	0,16	10	23	8	806	407
<i>Chenopodium quinoa</i>	3	3,31	0,33	3,4	1,35	0,52	0,24	12	47	14	1796	848
<i>Chenopodium quinoa</i>	4	3,7	0,52	4,45	0,83	0,48	0,25	33	29	11	149	714
Testigo <i>Chenopodium quinoa</i>	1	2,01	0,66	3,41	2,51	0,59	0,25	30	45	10	1252	79
Testigo <i>Chenopodium quinoa</i>	2	2,47	0,72	4,3	2,5	0,61	0,23	98	43	5	307	44
Testigo <i>Chenopodium quinoa</i>	3	2,51	0,67	3,98	2,34	0,6	0,32	35	47	6	338	50
Testigo <i>Chenopodium quinoa</i>	4	1,84	0,46	4,38	1,99	0,62	0,22	26,33	30	13,33	1565,33	162
<i>Canna indica</i>	1	1,82	0,19	2,47	2,44	0,77	0,22	30	24	19	3045	168
<i>Canna indica</i>	2	1,75	0,36	4,87	1,73	0,64	0,21	24,5	22,5	15	1722	203,5
<i>Canna indica</i>	3	1,78	0,27	3,67	2,08	0,7	0,21	27,25	23,25	17	2383,5	185,75
<i>Canna indica</i>	4	1,76	0,31	4,27	1,9	0,67	0,21	25,87	22,87	16	2052,75	194,62
Testigo <i>Canna indica</i>	1	0,53	0,16	1,39	0,61	0,8	0,11	4	28	14	840	324

Testigo <i>Canna indica</i>	2	2,74	0,57	7,77	0,78	0,43	0,18	18	20	10	298	136
Testigo <i>Canna indica</i>	3	1,69	0,54	7,28	1,02	0,52	0,21	19	21	11	399	239
Testigo <i>Canna indica</i>	4	1,65	0,42	5,48	0,8	0,58	0,16	13,66	23	11,66	512,33	233

Fuente: Autor

Anexo E: Comparación de medias de la altura de *Chenopodium quinoa*, prueba de Tukey a con $p < 0,05$.

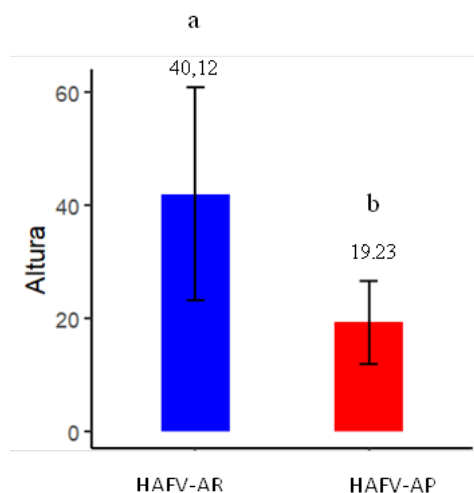


Figura 43: Comparación de medias en la FV (V5) entre HAFV con agua residual y HAFV con agua potable

Fuente: Autor

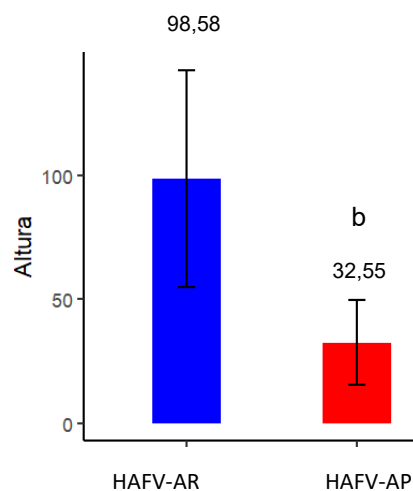


Figura 44: Comparación de medias en la FR (R11) entre HAFV con agua residual y HAFV con agua potable

Fuente: Autor

Anexo F: Comparación de medias de la altura de *Canna indica*, prueba de Tukey con $p < 0,05$.

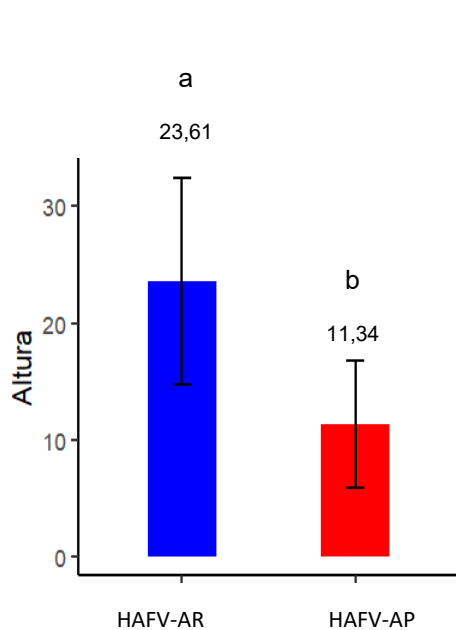


Figura 45: Comparación de medias en el Estadio 2 entre HAFV con agua residual y HAFV con agua potable

Fuente: Autor

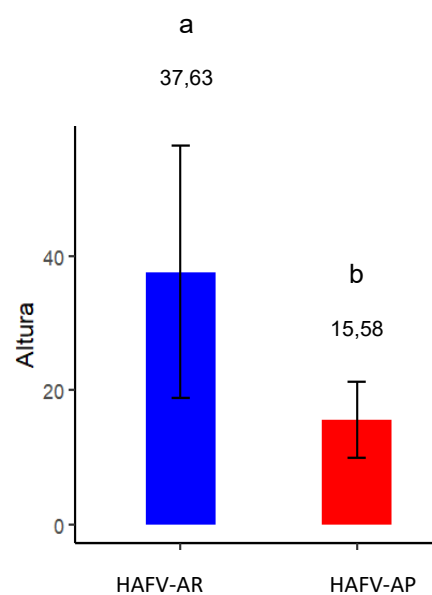


Figura 46: Comparación de medias en el Estadio 4 entre HAFV con agua residual y HAFV con agua potable

Fuente: Autor

Anexo G: Comparación de medias del diámetro de *Chenopodium quinoa*, prueba de Tukey con $p < 0,05$.

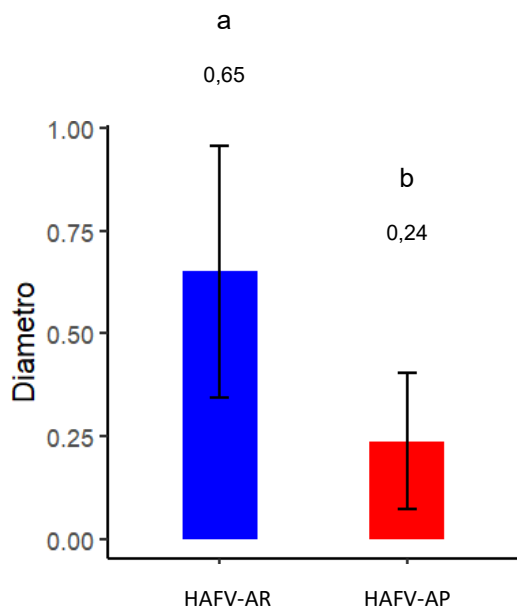


Figura 47: Comparación de medias en la FV (V5) entre HAFV con agua residual y HAFV con agua potable

Fuente: Autor

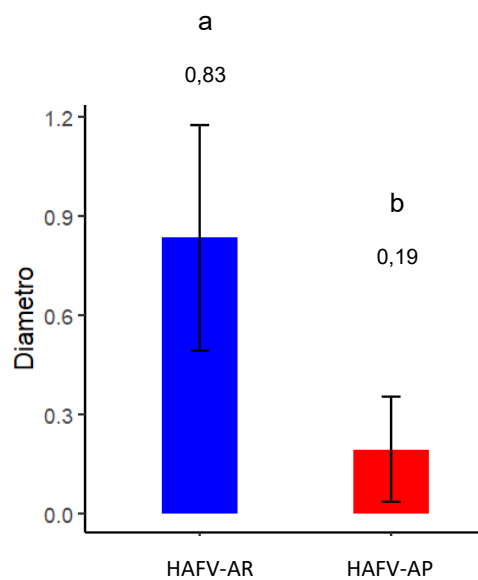


Figura 48: Comparación de medias en la FR (R11) entre HAFV con agua residual y HAFV con agua potable

Fuente: Autor

Anexo H: Comparación de medias del diámetro de *Canna indica*, prueba de Tukey con $p < 0,05$.

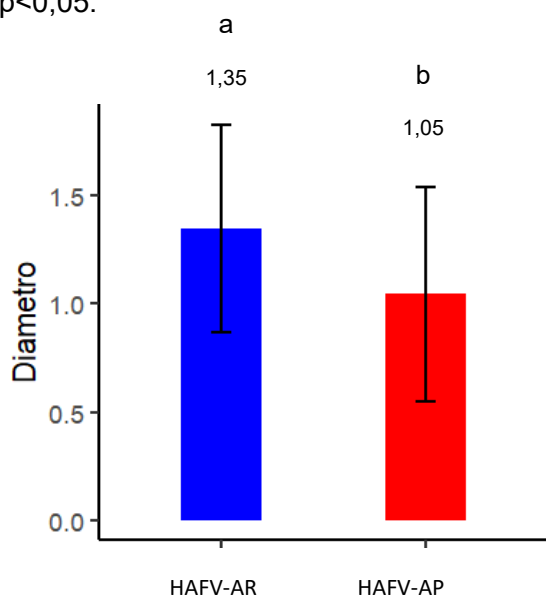


Figura 49: Comparación de medias en el Estadio 2 entre HAFV con agua residual y HAFV con agua potable

Fuente Autor

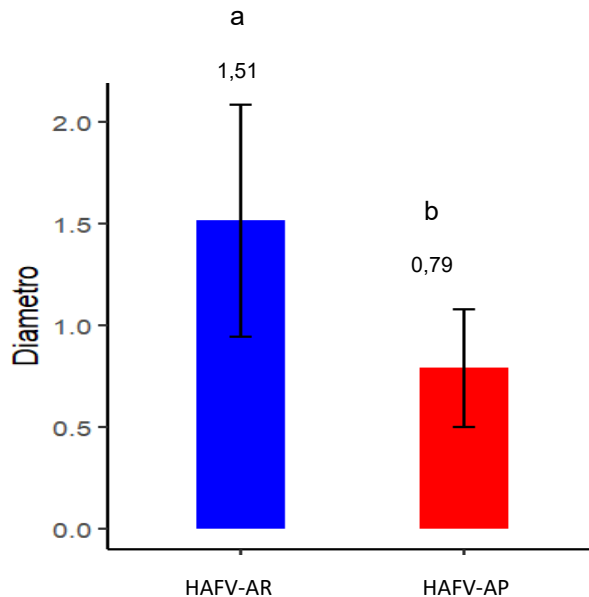


Figura 50: Comparación de medias en el Estadio 4 entre HAFV con agua residual y HAFV con agua potable

Fuente: Autor

Anexo I: Comparación de medias del área foliar de *Chenopodium quinoa*, prueba de Tukey con $p < 0,05$.

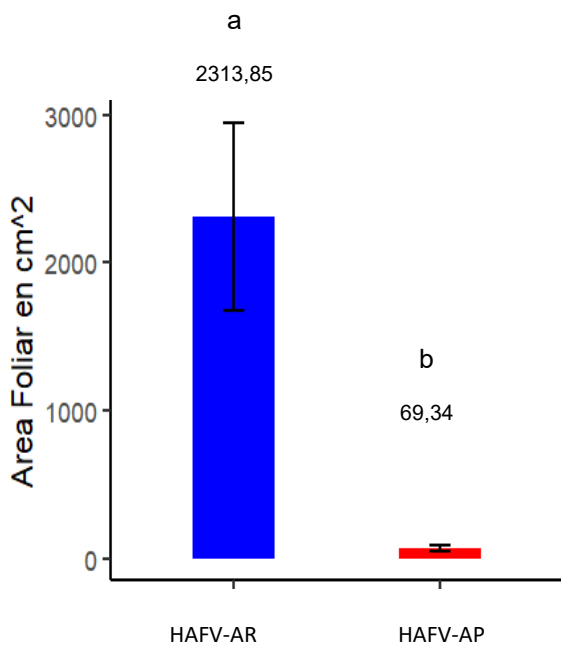


Figura 51: Comparación de medias en la FV (V5) entre HAFV con agua residual y HAFV con agua potable

Fuente: Autor

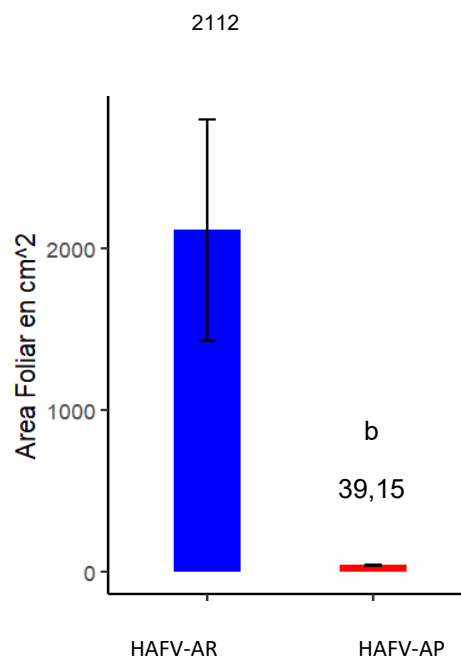


Figura 52: Comparación de medias en la FR (R11) entre HAFV con agua residual y HAFV con agua potable

Fuente: Autor

Anexo J: Comparación de medias del área foliar de *Canna indica*, prueba de Tukey con $p < 0,05$.

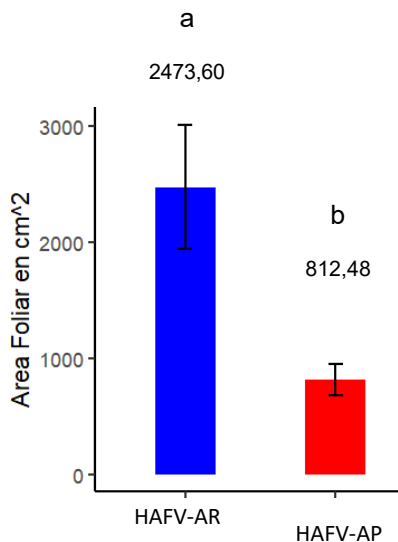


Figura 53: Comparación de medias en el Estadio 2 entre HAFV con agua residual y HAFV con agua potable

Fuente: Autor

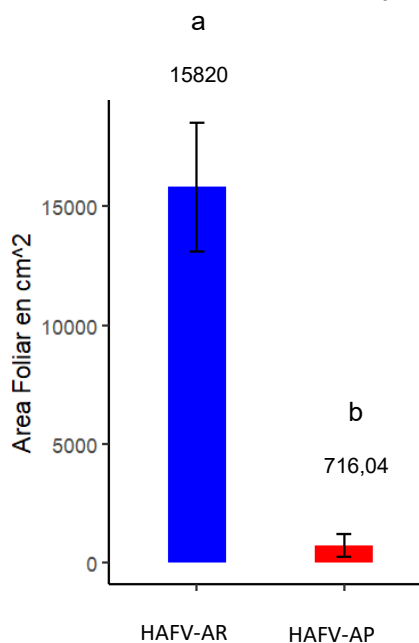


Figura 54: Comparación de medias en el Estadio 4 entre HAFV con agua residual y HAFV con agua potable

Fuente: Autor