

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA DE BIOSISTEMAS

*Diseño de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial vertical para el
tratamiento de aguas residuales porcinas en la finca Linda Vista en Santa Cruz de
Turrialba*

Trabajo Final de Graduación presentado ante la Escuela de Ingeniería de Biosistemas como
requisito para optar por el grado de:

Licenciatura en Ingeniería Agrícola y de Biosistemas

Tatiana Vásquez Alvarado

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio
San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica
2023

Trabajo Final de Graduación sometido a revisión por la Comisión de Trabajos Finales de Graduación de la Escuela de Ingeniería de Biosistemas de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Costa Rica, como requisito para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Agrícola y de Biosistemas.



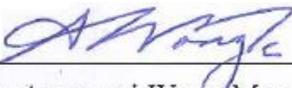
Ing. Tatiana Vásquez Alvarado, Bach.

Postulante.



Ing. Ronald Aguilar Álvarez, Ph.D.

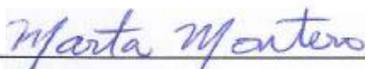
Director, Comité Asesor



Ing. Anayansi Wong Monge, Lic.
Miembro, Comité Asesor



Ing. Paola Vidal Rivera, M.Sc.
Miembro, Comité Asesor



Ing. Marta Montero Calderón, Ph.D.
Miembro, Tribunal Examinador



Ing. Sisgo Acuña Chinchilla, M.Sc.
Miembro, Tribunal Examinador

Dedicatoria

A mis padres, Jéssica y Maggil.

A mis abuelos, Jorge y Jania.

A mi compañero de vida y mi apoyo, Carlos.

A mi razón de ser, Elisa.

Agradecimientos

*A Dios y la Virgen,
por permitirme concluir satisfactoriamente
esta etapa tan linda de mi vida.*

*A la Universidad de Costa Rica,
por hacer posible mi formación profesional.*

*A la Escuela de Ingeniería de Biosistemas y sus profesores,
por todo el apoyo y educación que me
brindaron durante mi tiempo en la universidad.*

*Al Ing. Ronald Aguilar Álvarez,
por la confianza brindada, sus consejos y aportes que me
permitieron llevar a cabo este TFG.*

*A las ingenieras Anayansi Wong Monge y Paola Vidal Rivera,
por su disposición de colaborar en este TFG, sus consejos y correcciones.*

*Al señor Jorge Camacho,
por permitirme brindar mi aporte en su finca y llevar a cabo este TFG.*

*A Carlos Maroto, Jesús Guevara, Alberto Maroto, Ensio Pérez y José Araya,
porque sin su ayuda no habría salido adelante con este proyecto.*

*A mi familia y amigos,
por brindarme apoyo cada vez que lo necesité.*

RESUMEN

El recurso hídrico es uno de los más valiosos que nos brinda la naturaleza y es cada vez más escaso, además, el agua utilizada en procesos industriales no se reincorpora con la misma calidad al ambiente. La industria ganadera para producción de cerdos se encuentra en constante crecimiento, por lo que cada vez se incrementa más la producción de residuos porcinos y muchas fincas a nivel nacional no cuentan con tratamientos para las aguas residuales que generan. Los humedales artificiales representan una alternativa económica y eficiente que podría emplearse para tratar esos remanentes en las fincas porcinas del país. Por lo tanto, este proyecto consiste en evaluar la eficiencia del tratamiento de aguas residuales de origen porcino mediante sistemas de sedimentadores y humedales artificiales de flujo subsuperficial vertical (HSSFV), utilizando tres diferentes materiales en los humedales: piedras de río (PR), roca volcánica basáltica (RV) y tapas plásticas (TP) como medios de soporte en sistemas a escala piloto para luego establecer un diseño para la finca Linda Vista en Santa Cruz de Turrialba. El estudio se llevó a cabo utilizando nueve HSSFV, tres por cada tratamiento (PR, RV y TP), plantados con Botón de Oro (*Tithonia diversifolia*).

El objetivo específico 1 consistió en la implementación de los tres sistemas individuales a escala piloto de HSSFV. Previo a su instalación fue necesario caracterizar las condiciones de la finca Linda Vista y de las aguas residuales producidas. Las aguas residuales consisten en excreta porcina y restos de alimento concentrado mezclados con el agua cuando se hace un barrido en húmedo del piso. El barrido con agua genera un agua residual con una carga inicial de materia orgánica de 32887,5 mg DQO/L y un consumo de agua de 1,66 m³/d. Esta carga es muy alta para ser tratada por sistemas de humedales. Se propuso un barrido en seco de las excretas previo al lavado con agua de las porquerizas. Una vez removidas las excretas con una pala y escoba, al lavar con agua los pisos, hubo una reducción de un 82% de la carga orgánica presente en las aguas residuales y 22,2% del consumo de agua durante el lavado. Aplicando la práctica de barrido en seco e implementando sedimentadores se logró reducir hasta un 75,7% la carga orgánica, llegando a valores de 1435 mg DQO/L. Con base en esta concentración y un caudal de 1,15 m³/d se diseñaron los humedales piloto. Estos

humedales funcionaron bajo las siguientes condiciones de operación: un área 0,33 m², profundidad de 0,59 m, un nivel del agua de 0,44 m, una carga orgánica de diseño de 20 g DQO/m²/d, un caudal de 5 L/d, una carga hidráulica de 13,9 mm/d y un tiempo de retención hidráulica de 15 días. Cada humedal se conformó de tres capas de distintos materiales con diferente espesor, de arriba hacia abajo: 0,17 m de arena fina de río, 0,30 m del sustrato en estudio (PR, RV y TP) y 0,12 m canto rodado de río. Se estableció una lámina de agua permanente de 0,44 m de altura, dejando 0,15 m libres en los humedales. Se dio un tiempo de establecimiento de los humedales de 3 meses.

El objetivo específico 2 consistió en caracterizar los parámetros fisicoquímicos de las aguas residuales de origen porcino a la entrada y salida de cada sistema individual de humedales. Los parámetros analizados fueron demanda química de oxígeno (DQO) y sólidos sedimentables (SSed). Además, adicional a lo propuesto se analizó potencial de hidrógeno (pH), turbidez, conductividad eléctrica (CE), nitrógeno amoniacal, nitrato y fosfato. Con el fin de determinar si los sustratos en estudio (PR, RV y TP) permitían un mejor tratamiento. Importante destacar que, si se presentaron diferencias significativas entre el agua de entrada y el efluente de los humedales, a excepción del pH y la CE. La concentración de DQO de entrada a los humedales fue $6362,73 \pm 4270,56$ mg/L. Se encontró que no hubo diferencias significativas entre tratamientos, pero sí al evaluar los parámetros de DQO y SSed. Los tratamientos de los humedales con sustrato de TP y PR permitieron obtener mayores eficiencias de remoción de DQO, 58,6% y 48,1% respectivamente. Las concentraciones de entrada de SSed estuvieron entre 0,1 mL/L y 20 mL/L y las concentraciones iniciales de turbidez fueron de $439,47 \pm 177,26$ NTU. Los humedales con sustrato de TP lograron remover un 83,7% de SSed y 74,8% de turbidez, mientras que los humedales con sustrato de RV removieron un 79,0% de SSed y 67,9% de turbidez. En los humedales con sustrato de PR se logró una remoción de 46,7% del Nitrógeno Total, las concentraciones de entrada fueron de $600,38 \pm 35,34$ mg/L. A pesar de esa remoción, las concentraciones de nitrógeno son de cuidado en las aguas residuales porcinas, ya que sus concentraciones son muy elevadas

y pueden provocar toxicidad para las plantas. Con base en los resultados encontrados se recomienda el uso de TP como sustrato para humedales.

El objetivo específico 3 consistió, con base en los resultados de los sistemas piloto, en elaborar el diseño del sistema de humedales a una escala real según las necesidades de la finca Linda Vista. Para un adecuado funcionamiento del humedal, se requiere que se realice una limpieza en seco de la excreta, previo al lavado con agua. Con base a los datos preliminares tomados al aplicar el barrido en seco de la excreta, el caudal de diseño se estableció en $1,15 \text{ m}^3/\text{d}$. Previo al humedal se requiere un sistema de remoción de grasas y sólidos. Por tanto, se diseñó un tren de tratamiento compuesto por trampa de grasa y tanque séptico como tratamiento primario. La trampa de grasa cuenta con dimensiones de 0,8 m de profundidad, 1 m de ancho y 2 m de largo. La eficiencia de remoción de materia orgánica de diseño para la trampa de grasa es de 20% con un tiempo de retención hidráulico (TRH) de 24 horas. El tanque séptico se diseñó con dimensiones de 1,2 m de profundidad, 8,1 m de largo y 2,70 m de ancho. La eficiencia de este sistema se estableció en 50% con un TRH de 3 días. Con el barrido en seco y el tratamiento primario diseñado, la concentración del afluente del humedal de flujo vertical se estableció en 6362,73 mg DQO/L. La concentración del efluente de este humedal se estableció en 800 mg DQO/L, con base en el Reglamento de Vertido y Reúso de Aguas Residuales, cuyo valor máximo permitido es de 1000 mg DQO/L. Finalmente, considerando una temperatura de $17 \text{ }^\circ\text{C}$, se dimensionó el humedal utilizando el modelo de flujo de tapón modificado ($k-C^*$). Con base en estos datos de diseño, se establecieron las dimensiones del humedal de tipo HSSFV. La profundidad del humedal es de 0,7 m y se determinó que debe tener 3,6 m de largo por 3,2 m de ancho, con un área superficial resultante de $11,52 \text{ m}^2$. El TRH del sistema es de 3 días. Se brinda también la opción de elaborar un sistema híbrido de humedales añadiendo un HSSFH conectado en serie con el HSSFV. Las dimensiones del HSSFH son de 0,4 m de profundidad, 2,79 m de largo y 1,40 m de ancho. La concentración final del efluente se estableció en 500 mg DQO/L.

ÍNDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS	4
2.1. Objetivo General	4
2.2. Objetivos Específicos	4
3. MARCO TEÓRICO	5
3.1. Humedales Artificiales (HA)	5
3.2. Funciones de los Humedales Artificiales	6
3.3. Tipos de Humedales Artificiales	7
3.4. Remoción de Contaminantes en Humedales Artificiales	9
3.4.1. <i>Remoción de sólidos sedimentables</i>	9
3.4.2. <i>Remoción de materia orgánica</i>	10
3.4.3. <i>Remoción de nitrógeno</i>	11
3.4.4. <i>Remoción de fósforo</i>	12
3.5. Sustratos y Vegetación Utilizados en Humedales Artificiales	13
3.6. Características de las Aguas Residuales Con Purines de Cerdo	17
3.7. Experiencias Previas en el Uso de Humedales Artificiales en Fincas de producción porcina	19
3.8. Normativa Costarricense de Aguas Residuales en Granjas Porcinas	22
4. METODOLOGÍA	26
4.1. Evaluación de las Condiciones de Producción y Manejo de Residuos de la Finca	26
4.1.1. <i>Área de estudio</i>	26
4.1.2. <i>Condiciones iniciales en el sistema de producción y manejo de residuos</i>	29
4.1.3. <i>Diseño del sistema de separación de sólidos</i>	30
4.2. Primera Etapa Experimental: Sistema de Humedales a Escala Piloto	33
4.2.1. <i>Conformación de unidades piloto</i>	33
4.2.2. <i>Condiciones de operación de los humedales piloto</i>	39
4.2.3. <i>Muestreos y caracterización de aguas en las unidades piloto</i>	41
4.2.4. <i>Remoción de contaminantes</i>	42
4.2.5. <i>Crecimiento de las plantas</i>	42
4.2.6. <i>Análisis estadístico</i>	43
4.3. Segunda Etapa Experimental: Humedal a Escala Real	44

4.3.1. <i>Diseño de tren de tratamiento a escala real para la Finca Linda Vista.</i>	44
5. RESULTADOS	48
5.1. Implementación de los Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial Vertical	48
5.1.1. <i>Condiciones iniciales de la Finca Linda Vista</i>	48
5.1.2. <i>Determinación del caudal de alimentación de las unidades de humedales piloto</i>	55
5.1.3. <i>Características de los sustratos analizados en las unidades de humedales piloto.</i>	56
5.1.4. <i>Funcionamiento de los sistemas de humedales piloto.</i>	58
5.2. Evaluación de la Eficiencia de los Sistemas de Humedales Piloto Con Base en los Sustratos Evaluados.	59
5.2.1. <i>Condiciones ambientales presentes en la Finca Linda Vista</i>	59
5.2.2. <i>Caracterización de las aguas residuales y eficiencias de remoción de contaminantes en los sistemas de humedales piloto.</i>	59
5.2.3. <i>Adaptación y crecimiento de Tithonia diversifolia en humedales artificiales para tratamiento de purines de cerdo.</i>	71
5.3. Dimensionamiento de Sistema de Tratamiento Real Para la Finca Linda Vista	76
5.3.1. <i>Trampa de grasas.</i>	76
5.3.2. <i>Tanque séptico.</i>	78
5.3.3. <i>Humedal subsuperficial de flujo vertical.</i>	80
5.3.4. <i>Humedal artificial subsuperficial de flujo horizontal.</i>	82
6. CONCLUSIONES	85
7. RECOMENDACIONES	89
8. LIMITACIONES	91
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	92
ANEXOS	96
Anexo A. Plano las porquerizas de la Finca Linda Vista y ubicación de la estructura para instalación de humedales piloto.	96
Anexo B. Plano de porquerizas de la Finca Linda Vista con vistas del sistema de drenaje y conexión al sistema de tratamiento piloto.	97
Anexo C. Concentración de los parámetros de calidad de agua residual analizados con respecto al tiempo, del agua de entrada y los efluentes (tapas plásticas, piedras de río y roca volcánica) en el sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial de flujo vertical a escala piloto.	98
Anexo D. Guía para producción más limpia en la Finca Linda Vista.	102

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

HA	Humedal Artificial
HFS	Humedal de Flujo Superficial
HSS	Humedal Subsuperficial
HSSFH	Humedal Subsuperficial de Flujo Horizontal
HSSFV	Humedal Subsuperficial de Flujo Vertical
MO	Microorganismos
TRH	Tiempo de Retención Hidráulica
DBO₅²⁰	Demanda Biológica de Oxígeno (5 días a 20°C)
DQO	Demanda Química de Oxígeno
NH₃-N	Nitrógeno Amoniacal
NO₃-N	Nitrato
NT	Nitrógeno Total
PT	Fósforo Total
PO₄-P	Fósforo
SST	Sólidos Suspendidos Totales
SSed	Sólidos Sedimentables
SDT	Sólidos Disueltos Totales
OD	Oxígeno Disuelto
TP	Tapas Plásticas
PR	Piedras de Río
RV	Roca Volcánica

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Humedal artificial subsuperficial de flujo horizontal.....	8
Figura 2. Humedal artificial subsuperficial de flujo vertical.....	9
Figura 3. Vista satelital de la finca Linda Vista.....	27
Figura 4. Estructura de techo con sarán negro 50% de sombra.....	28
Figura 5. Estructura de techo con plástico transparente para invernadero.....	28
Figura 6. Tina tipo bebedero horizontal.....	30
Figura 7. Tanque IBC de 1 m ³	31
Figura 8. Ubicación de los tanques IBC.....	32
Figura 9. Diagrama de colocación de tuberías de entrada y salida en tanques IBC.....	33
Figura 10. Diagrama de dimensiones de las unidades piloto.....	34
Figura 11. Distribución de orificios en tubería de drenaje para humedales piloto.....	34
Figura 12. Distribución de capas en los humedales, dimensiones en cm.....	36
Figura 13. Colocación de primeras capas de material filtrante en humedales piloto.....	37
Figura 14. Conexión de sistema de abastecimiento de humedales con tubería PVC.....	38
Figura 15. Sistema de PVC para la aplicación de riego en los humedales piloto.....	38
Figura 16. Grietas en pisos y caños de la porqueriza	49
Figura 17. Barrido en húmedo de los sólidos en la porqueriza.....	50
Figura 18. Barrido en seco y recolección de excretas.....	51

Figura 19. Medición del peso de las excretas recolectadas con barrido en seco.....	51
Figura 20. Compostaje de sólidos recolectados con barrido en seco.....	51
Figura 21. Comparación de resultados de SSed y DQO con barrido en húmedo (izquierda) y con barrido en seco (derecha).....	53
Figura 22. Capa de grasa formada en tanques separadores de sólidos.....	54
Figura 23. Tapas plásticas de distintos tamaños utilizadas como sustrato en tres unidades de humedales piloto.....	56
Figura 24. Muestra de rocas volcánicas utilizadas como sustrato en tres unidades de humedales piloto.....	57
Figura 25. Muestra de piedras de río utilizadas como sustrato de tres unidades de humedales piloto.....	57
Figura 26. Comparación entre el agua de entrada (E) y los efluentes de cada tratamiento: Tapas plásticas (T), piedra de río (P) y roca volcánica (R).....	64
Figura 27. Agua de salida de cada subsistema. De derecha a izquierda: agua de entrada, agua de salida del humedal 1, agua de salida del humedal 2 y agua de salida del humedal 3 (Gómez et al., 2010).....	64
Figura 28. Gráfico de cajas para las concentraciones de sólidos sedimentables del agua de entrada y los tratamientos en estudio.....	66
Figura 29. Gráfico de cajas para las concentraciones de sólidos sedimentables del agua de entrada y los tratamientos en estudio.....	68
Figura 30. Curva de crecimiento promedio de Botón de Oro en humedales piloto.....	74
Figura 31. Crecimiento de planta con amarillamiento de hojas y recuperación.....	75
Figura 32. Crecimiento de planta con amarillamiento y muerte.....	75
Figura 33. Diagrama del tren de tratamiento de aguas residuales propuesto para la Finca Linda Vista.....	76

1. INTRODUCCIÓN

El recurso hídrico es uno de los más valiosos que nos brinda la naturaleza y es cada vez más escaso a nivel mundial (Araya, 2012), debido a que el ser humano utiliza altos volúmenes de agua en las actividades del hogar, las industrias, la agricultura y la ganadería. Estas aguas no se reincorporan con la misma calidad al ambiente una vez que es utilizada, por lo que, a lo largo de los años se han buscado alternativas para tratar las aguas residuales de diferente índole. Por ejemplo, a partir del año 1893 se empezaron a usar filtros biológicos en el Reino Unido para limpiar las aguas residuales de hogares, los cuales consistían en biopelículas colocadas sobre rocas de ríos. En 1913 se creó el sistema de lodos activados (Henze, van Loosdrecht, Ekama, & Brdjanovic, 2017). Todo esto se hizo con el fin de reducir la tasa de contaminación de los mantos acuíferos y todas las repercusiones que esto trae consigo (Andrés, 2010). Algunas tecnologías como procesos de lodos activados o biorreactores de separación por membrana, empleadas a nivel mundial para tratamiento de agua, tienen costos elevados, sin embargo, existen alternativas de fácil acceso económico con las que se obtienen eficiencias elevadas de remoción de contaminantes, tal es el caso de los humedales artificiales (HA) (Castañeda, 2017).

Los sistemas de HA se han utilizado desde hace décadas. En 1990 tuvieron un repunte debido a que se trata de una “tecnología verde” capaz de tratar aguas residuales de distintos orígenes (Araya, 2012), como las provenientes de granjas porcinas. En el mundo se produjeron entre los años 2005 y 2010 una cantidad de 1200 millones de cerdos por año (Garzón-Zúñiga & Buelna, 2014). Esta industria se encuentra en constante crecimiento por tratarse de producción de alimento humano, de manera que la demanda de carne aumenta con el crecimiento demográfico, por lo que cada vez se incrementa más la producción de residuos porcinos.

En el caso de Costa Rica, en el período de 2013 a 2016, el Consejo Nacional de Producción ha reportado un crecimiento promedio del 6% de las extracciones de cabezas de

cerdo (Consejo Nacional de Producción, 2016). Esto significa que la producción ha crecido. Sin embargo, aunque en el país se cuenta con el “Reglamento de Granjas Porcinas N° 32312”, donde se indica que se debe dar un adecuado tratamiento a los desechos sólidos y líquidos, muchas fincas no cuentan con tratamientos para las aguas residuales que generan. De manera contraria, las liberan a ríos o quebradas cercanos, causando malos olores, contaminación de aguas subterráneas, gases de efecto invernadero y proliferación de plagas. Esto debido a que las excretas porcinas contienen altos contenidos de nitratos y fósforo, además de gran cantidad de sólidos suspendidos y materia orgánica (Pérez, Pereda, Correia, Pozzi, Kwong, Oliva, & Zaiat, 2019). Generalmente, en el país se dan diversos manejos a los remanentes de las fincas porcinas, tales como tanques sépticos, reactores, lagunas integradas, producción de biogás, compost, e incluso se utilizan en la alimentación de novillos y en lagunas de producción de tilapia (Padilla, 2010). Todos los procesos de tratamiento de residuos mencionados anteriormente cumplen con cierta porción del tratamiento de los residuos sólidos y líquidos. Sin embargo, el efluente aún presenta altas concentraciones de contaminantes que son perjudiciales al ambiente si se vierten. Por tanto, como sistema complementario, los HA representan una alternativa económica y eficiente que podría emplearse para tratar esos remanentes en las fincas porcinas del país, proveyendo a la vez un agua de reúso sin implicaciones al ambiente.

Los sistemas de HA generalmente utilizados para tratar aguas residuales en Costa Rica contienen piedra cuarta de río como medio de soporte, ya que es el material que se emplea por defecto para las biojardineras. Sin embargo, existen otros tipos de materiales que tienen el potencial de actuar como soporte y pueden otorgar incluso mayores eficiencias a los humedales, tales como minerales naturales como la roca volcánica basáltica (Seguel, 2019) o partículas de plástico (Hegg, 2018), cuya porosidad es mayor a la de la piedra cuarta de río.

Los productores de granjas porcinas en nuestro país requieren de asesorías y herramientas que les permitan manejar adecuadamente sus aguas residuales. El presente proyecto se llevará a cabo en la finca Linda Vista, gracias a la colaboración del Sr. Jorge

Camacho, propietario de esta. Con respecto a las aguas residuales que genera la finca, actualmente utilizan las aguas residuales, sin previo tratamiento, para regar el pasto. El riego del pasto lo realizan mediante gravedad con una manguera que van moviendo a lo largo del terreno, pero, según indican los trabajadores de la finca, la presencia de sólidos en el flujo es tan alta que se tiende a obstruir la manguera, por lo que tienen que sacudirla para destacarla. Además, la aplicación directa del agua residual a los pastos genera procesos de contaminación difusa que impactará el ambiente. Por ejemplo, existe un riachuelo que atraviesa la finca, el cual se puede ver contaminado por la alta carga orgánica que tienen las aguas utilizadas para riego.

Este proyecto de práctica dirigida resultó de la solicitud expresa del dueño de la finca por su preocupación de establecer un tratamiento en las aguas residuales generadas. Actualmente, no se cuenta con un tratamiento de ningún tipo, sino que se dirige el agua que sale de la porqueriza hacia los distintos potreros de la finca. En términos generales, con el fin de mantener la finca en operación y cumplir con las regulaciones nacionales. Este proyecto consiste en evaluar la eficiencia del tratamiento de aguas residuales de origen porcino mediante sistemas de sedimentadores y humedales artificiales, utilizando tres diferentes materiales en los humedales: piedras de río, roca volcánica basáltica y tapas plásticas como medios de soporte en sistemas a escala piloto para luego establecer el mejor diseño para la finca de interés.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo General

Establecer el diseño de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial vertical para el tratamiento de las aguas residuales porcinas de la finca Linda Vista en Santa Cruz de Turrialba.

2.2. Objetivos Específicos

1. Implementar tres sistemas individuales a escala piloto de humedales artificiales de flujo subsuperficial vertical en paralelo utilizando diferentes materiales (roca volcánica basáltica, tapas plásticas y piedra de río) como medio de soporte para tratar el agua residual de la finca porcina Linda Vista.
2. Caracterizar en los laboratorios de la Escuela de Ingeniería de Biosistemas los parámetros fisicoquímicos de las aguas residuales de origen porcino a la entrada y salida de cada sistema individual de humedales para identificar cuál de los tres sistemas analizados resulta mejor para el tratamiento de las aguas residuales porcinas de la finca Linda Vista.
3. Elaborar el diseño del sistema de humedales que mejor se adapta a las necesidades de la finca Linda Vista a una escala real con base en los resultados de reducción de carga orgánica obtenidos en el estudio a escala piloto.

3. MARCO TEÓRICO

3.1. Humedales Artificiales (HA)

Los HA son sistemas de tratamiento de aguas basados en los procesos espontáneos de purificación del agua que se dan en los humedales naturales (Blanco, 2014). Estos sistemas tienen su origen en la década de 1960 en Alemania con las investigaciones de Käthe Seidel y en 1970 continuó con el trabajo realizado por Reinhold Kickuth (Vymazal, 2009). Los humedales construidos, como también se les conoce, tienen una alta capacidad para tratar aguas residuales debido a los sistemas biológicos complejos que en ellos se desarrollan. Por eso, se ha aumentado rápidamente el uso de este tipo de tecnología desde 1985 (Blanco, 2014).

El uso de HA se dio inicialmente para el tratamiento de aguas residuales de origen urbano, pero actualmente se ha ampliado su uso a otros tipos de aguas como aguas servidas, aguas residuales de fuentes industriales, agrícolas, ganaderas, entre otras (Fuenzalida, 2012). Debido a su gran versatilidad, incluso pueden tratar lixiviados de vertederos (Blanco, 2014).

Estos sistemas consisten básicamente en un hoyo, tanque o laguna, cuyas paredes deben evitar la infiltración del agua al subsuelo y son llenados con un material filtrante o sustrato en el cual se plantan generalmente macrófitos, que son plantas resistentes a condiciones de saturación (UN-HABITAT, 2008). Debido a su simplicidad, son considerados como parte de los sistemas blandos de tratamiento de aguas residuales, pues requieren menos costos y su operación es sencilla en comparación con los sistemas de tratamiento intensivos, además de abarcar mayores áreas de terreno para su funcionamiento (Fernández et al., 2014).

3.2. Funciones de los Humedales Artificiales

En un humedal artificial, el agua contaminada es suministrada mediante una tubería de abastecimiento. Este efluente debe atravesar todas las capas del sustrato dentro del humedal en un determinado período, conocido como tiempo de retención hidráulica (TRH), para ser recolectado posteriormente por otra tubería, por donde sale tratada. Dentro de los HA se dan una serie de procesos físicos, químicos y biológicos que permiten el tratamiento de los contaminantes mediante la acción de vegetación y microorganismos (UN-HABITAT, 2008).

En las distintas capas de sustrato empleado en un HA se dan la mayoría de estos procesos, ya que el sustrato es el que permite el enraizamiento de las plantas, las cuales ayudan a la oxigenación, absorción de nutrientes y el desarrollo de las poblaciones microbianas; y la fijación de microorganismos (MO) aerobios, anaerobios y facultativos que propician la degradación de sustancias químicas complejas en sustancia más simples y fáciles de tratar o de absorber por las plantas (Bernal, 2014). Los MO capaces de desarrollarse dentro de los humedales se congregan en la materia orgánica e inorgánica del sustrato, lo que les permite aprovechar los componentes presentes en el agua contaminada que atraviesa el humedal, colaborando en la descomposición de los contaminantes (Ellis et al., 2003).

Además, el propio sustrato cumple funciones físicas de remoción de sólidos que vienen en el agua residual.

A pesar de que en los HA se da la presencia de zonas anóxicas, se debe evitar que estas zonas sean muy extensas, debido a que esto se da por la disminución en la porosidad del sustrato, de manera que el humedal se llega a colmar, lo cual disminuye su eficiencia en el tratamiento de los contaminantes (Hoffman et al., 2011).

3.3. Tipos de Humedales Artificiales

Existen diferentes configuraciones de HA, los cuales pueden dividirse según su hidrología en humedales de flujo superficial (HFS) y humedales de flujo subsuperficial (HSS). Los HFS se caracterizan porque la lámina de agua se encuentra por encima del lecho filtrante a modo de lagunas poco profundas y el agua se mueve horizontalmente, asemejando las condiciones de los humedales naturales (Vidal & Hormazábal, 2018). Mientras que en los HSS el agua pasa a través de un medio de soporte poroso conocido como sustrato. Dependiendo de cómo el agua pasa a través del sustrato, los HFSS se dividen en horizontales y verticales. En los humedales subsuperficiales de flujo horizontal (HSSFH), la lámina de agua se maneja a 5 cm por debajo de la superficie de ese medio. Los humedales subsuperficiales de flujo vertical (HSSFV) se caracterizan por un flujo intermitente del agua a través del sustrato de manera vertical. Por esta razón no hay presencia de una lámina de agua constante dentro del sustrato del humedal. En el caso de los HFSS, el agua que va a ser tratada no se encuentra expuesta al ambiente, lo que se considera una ventaja al disminuir los riesgos de contacto con los contaminantes (Araya, 2012). En ambos diseños se utilizan plantas para favorecer el tratamiento del agua (Blanco, 2014).

En los HSSFH el agua es suministrada por un lado y va fluyendo lentamente a través de un medio poroso de forma horizontal hasta alcanzar el otro lado del humedal, donde ingresa a una tubería de salida, como se observa en la Figura 1. Este tipo de humedales tienen la capacidad de remover eficientemente los contaminantes orgánicos, sin embargo, se encuentran limitados en cuanto a la remoción de nutrientes como el nitrógeno (UN-HABITAT, 2008).

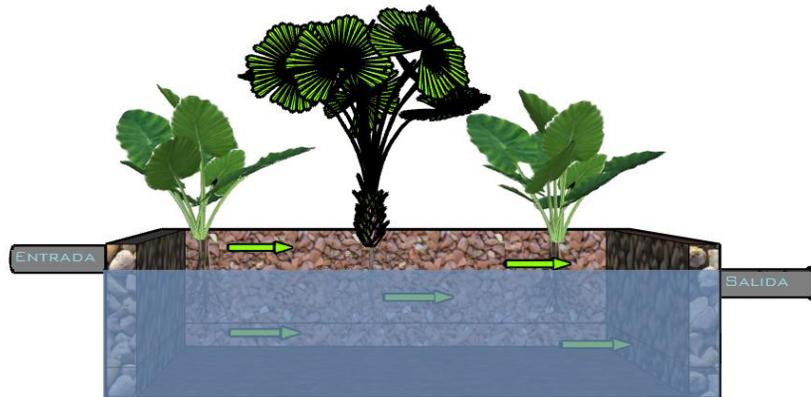


Figura 1. Humedal artificial subsuperficial de flujo horizontal.

Por otra parte, los HSSFV reciben el agua mediante una tubería que corre a lo largo de la superficie y permite el suministro del agua a manera de lluvia, por lo que el flujo se mueve de manera vertical en su interior hasta alcanzar otra tubería colocada en el fondo del lecho, por la cual el agua se filtra hasta salir del humedal una vez tratada, como se observa en el esquema de la Figura 2. Además, en el caso de los HSSFV se tienen otra serie de ventajas, tales como la ausencia de malos olores, y la posibilidad de reutilizar el agua que sale del sistema (Gómez, Salazar, Hernandez, Arias, & Bentancur, 2010), y comparados con los de flujo horizontal, éstos tienen una capacidad mayor de eliminar nitrógeno total y fósforo (Vidal & Hormazábal, 2018).

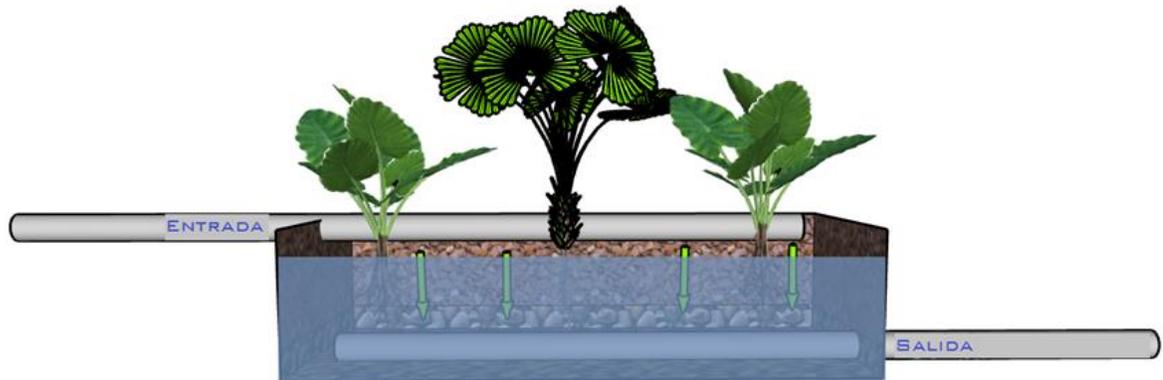


Figura 2. Humedal artificial subsuperficial de flujo vertical.

3.4. Remoción de Contaminantes en Humedales Artificiales

Dentro de los HA se dan una serie de procesos físicos, químicos y biológicos. Son estos procesos los que permiten el tratamiento de los contaminantes de las aguas residuales que pasan a través de las capas de sustrato de un HA, logrando transformarlos en sustancias de fácil digestión y descomposición para el medio ambiente.

3.4.1. Remoción de sólidos sedimentables

Se considera que el mayor problema que presentan las aguas residuales es la elevada cantidad de sedimento que llevan consigo, lo que implica que los sólidos representan la mayor complicación en los ecosistemas acuáticos (Rojas, 2005), principalmente los sólidos en suspensión. Estos sólidos en suspensión totales (SST) conforman la mayor parte de la materia orgánica arrastrada por el agua, sin embargo, gran cantidad se logra remover mediante sedimentación y filtración.

En los HA, la filtración ocurre a lo largo del humedal cuando los sólidos que van sedimentando son atraídos y capturados por las partículas del sustrato, el biofilm de microorganismos generado dentro de humedal, e incluso las partes de las plantas con las que tienen contacto (Blanco, 2014).

3.4.2. Remoción de materia orgánica

En las aguas residuales, por lo general, la materia orgánica tiene una alta presencia tanto de manera sólida como soluble, por lo que la remoción biológica suele ser la forma más común de degradar los contaminantes dentro de un HA (Bernal, 2014). Esto se debe a que los compuestos orgánicos son fuente de energía y carbono para la síntesis de biomasa tanto en las plantas como para los microorganismos (Blanco, 2014).

La presencia de oxígeno es determinante para la remoción de materia orgánica, ya que los microorganismos aeróbicos son los principales actores en los procesos biológicos que ocurren dentro de un HA. En estos procesos se llevan a cabo reacciones de reducción-oxidación donde se consumen elementos como carbono (C), nitrógeno (N) y azufre (S) (Bernal, 2014). En las áreas donde el oxígeno se vuelve escaso se dan otros procesos anaerobios donde la materia orgánica es degradada mediante bacterias facultativas, tal como las fermentaciones, en las que se producen alcoholes, ácidos grasos y dióxido de carbono e hidrógeno. Estos productos pueden ser transformados posteriormente en metano por microorganismos anaerobios (Blanco, 2014).

Por último, en las áreas de un HA donde el oxígeno no está presente, la respiración anaerobia toma mayor importancia en la degradación de la materia orgánica, favoreciéndose los procesos como la desnitrificación pero dificultando la remoción de fósforo (P) (Bernal, 2014).

3.4.3. Remoción de nitrógeno

El nitrógeno es un elemento que se presenta en la naturaleza de forma orgánica e inorgánica, y su remoción de las aguas residuales se considera importante debido a que un alto contenido de compuestos nitrogenados en los ambientes acuáticos genera una alta toxicidad para los seres vivos (Araya, 2012). Las formas orgánicas del nitrógeno presentes en aguas residuales son compuestos como la urea, aminoácidos, aminas, purinas y pirimidinas (Bernal, 2014), y se logran eliminar en su mayoría mediante la retención de la materia orgánica en suspensión de la cual forman parte.

Por otro lado, las formas inorgánicas más comunes son los nitritos (NO_2^-), nitratos (NO_3^-) y amonio (NH_4^+) o amoníaco (NH_3), y sus concentraciones varían dentro de un HA a causa de los procesos de transformación de un compuesto a otro mediante la acción bacteriana, la volatilización, adsorción al sustrato y asimilación (Bernal, 2014).

La asimilación es llevada a cabo por las plantas y microorganismos los cuales captan los compuestos inorgánicos como NH_4^+ y NO_3^- para formar compuestos estructurales (Araya, 2012). La volatilización es considerada un proceso fisicoquímico por el cual el amonio se encuentra en equilibrio con el amoníaco, y ese equilibrio depende del pH y la temperatura, por lo que si se rompe el equilibrio con valores de pH mayores a 8 se favorece la liberación de amoníaco a la atmósfera (Bernal, 2014).

La adsorción se puede explicar como una atracción del amonio por parte de las partículas de sustrato debida al intercambio catiónico favorecido por la carga positiva del ion NH_4^+ , y se considera un proceso reversible que varía según la composición química del agua. Posteriormente, el amonio adsorbido por el sustrato puede ser oxidado y convertido en NO_3^- , lo cual se ve favorecido al drenar periódicamente el agua del humedal, para que el oxígeno de la atmósfera pueda ingresar y que se lleve a cabo dicha reacción (Bernal, 2014).

Este proceso donde se pasa de NH_4^+ a NO_3^- se conoce como nitrificación, y se tiene NO_2^- como intermediario, sin embargo, esta forma no es químicamente estable, por lo que la

reacción continúa hasta que se forma el ion NO_3^- (Araya, 2012). Este ion es utilizado por las plantas para su crecimiento, pero en altas concentraciones puede representar un problema al favorecer el crecimiento de algas, lo cual reduce la cantidad de oxígeno en el agua, además de que la nitrificación como tal no elimina el nitrógeno, solo lo convierte de una forma a otra más fácil de tratar (Venegas, 2020). La nitrificación es un proceso estrictamente dependiente del oxígeno atmosférico, por lo que es llevado a cabo por bacterias autótrofas aerobias y solo se da en las zonas de un HA donde se presenten las condiciones aptas para su desarrollo. Estas bacterias utilizan una fuente inorgánica, CO_2 , como fuente de carbono.

Para lograr la eliminación de compuestos nitrogenados, en este caso el ion nitrato, es preciso que se lleve a cabo otro proceso llamado desnitrificación, que es la reducción del NO_3^- a N_2 atmosférico, generando dióxido de carbono y agua como subproductos (Araya, 2012). En la desnitrificación participan bacterias heterótrofas anaerobias facultativas en las zonas anóxicas de un HA, las cuales utilizan la materia orgánica como fuente de carbono. La combinación de nitrificación-desnitrificación puede lograr la depuración de hasta un 60 a 95% del nitrógeno presente en las aguas residuales (Bernal, 2014).

3.4.4. Remoción de fósforo

El fósforo es un nutriente fundamental para el desarrollo y crecimiento de las plantas, principalmente en ambientes de agua dulce, donde se considera un factor limitante (Blanco, 2014). Así mismo, el fósforo es indispensable en el desarrollo de microorganismos, y puede encontrarse en sus formas orgánicas o inorgánicas (fosfatos y ortofosfatos) (Bernal, 2014). Por lo general, en los HA el fósforo se encuentra en su forma de fosfatos (PO_4^{3-}) y existen varias vías por las que puede ser removido del agua residual, entre ellas la adsorción, precipitación, absorción y sedimentación (Araya, 2012).

El fósforo soluble en el agua residual puede ser captado y absorbido por las plantas y microorganismos para la reproducción celular y crecimiento de tejidos, mientras que las

formas insolubles pueden ser sedimentadas en sus formas particuladas o ser precipitadas o adsorbidas por el sustrato mediante procesos de interacción iónica con calcio, hierro y aluminio (Fuenzalida, 2012). La precipitación se da cuando el PO_4^{3-} interacciona con cationes metálicos que pueden ser aluminio o hierro bajo condiciones ácidas y calcio o magnesio bajo condiciones alcalinas, generando sólidos cristalinos amorfos cuando las concentraciones de fósforo en el agua son muy elevadas (Bernal, 2014).

La adsorción se da igualmente por la interacción con cationes metálicos presentes en las partículas del sustrato, atrayendo el PO_4^{3-} sin que éste forme parte de su estructura molecular (Bernal, 2014), no obstante, la capacidad de adsorción del sustrato es limitada, por lo cual depende de las características y composición del sustrato (Araya, 2012). De manera que la capacidad de retención del fósforo en un HA disminuye a lo largo del tiempo, conforme va disminuyendo la cantidad de espacios en las partículas de sustrato capaces de adsorber el PO_4^{3-} (Venegas, 2020). De esta manera, la capacidad de remoción de fósforo de un HA se ve afectada por el tamaño del humedal y del sustrato seleccionado como material de soporte (Fuenzalida, 2012), por lo que seleccionar adecuadamente el material de filtración es de suma importancia para lograr una buena depuración de las aguas residuales (Araya, 2012).

3.5. Sustratos y Vegetación Utilizados en Humedales Artificiales

Uno de los componentes más importantes en un HA es el medio, conocido como sustrato, en cual se desarrollará la microbiota y servirá de sostén para las plantas. Lo que se busca de este medio es que sea un material poroso, inerte, estéril y que además tenga una buena capacidad de retención del agua para asegurar que se puedan dar todos los procesos necesarios para la depuración de las aguas residuales y el desarrollo de las plantas (Sifuentes, 2018).

Para la construcción de humedales subsuperficiales se suele utilizar grava como lecho filtrante, sin embargo, se pueden emplear otros materiales que proporcionen un área superficial específica adecuada para el crecimiento de MO, con el fin de tener una mejoría en la eficiencia del tratamiento de aguas. Con frecuencia, las piedras de río son utilizadas como sustrato en humedales debido a su disponibilidad, ya que es un material generalmente empleado en construcción y como lastre para carreteras. Las rocas volcánicas son producto del enfriamiento de la lava al alcanzar la superficie terrestre y en su estructura suelen tener poros de diferentes tamaños causados por las burbujas de gas que se escapa durante la solidificación de la lava. Este es material que se utiliza en algunos casos como sustrato en HA debido a sus características y composición. La roca volcánica basáltica tiene un color gris oscuro a rojizo, además tiene un alto contenido de magnesio y hierro y entre un 42-52% de sílice. (Seguel, 2019).

Investigadores han estudiado diferentes posibilidades de que permitan obtener mejores rendimientos en cuanto al tratamiento de aguas residuales ordinarias y especiales. En Corea, Chen, Cheng, Niu y Kim (2013) llevaron a cabo un estudio en el cual evaluaron distintos tipos de materiales como sustrato para un HSSFV. Los materiales evaluados fueron astillas de madera, fibra sintética, grava y roca volcánica. Para el ensayo se usaron tubos de acrílico opaco oscuro de 0,1 m de diámetro y 1 m de largo como columnas correspondientes a los HSSFV. Se llenaron de arriba hacia abajo con 5 cm de grava, 5 cm de piedra grande, 55 cm del sustrato en estudio, 10 cm de piedra mediana y 10 cm de piedra grande. Adicionalmente, se sembró *Acorus Calamus* (cálamo aromático) en la superficie de cada columna. Los humedales se alimentaron con 2,1 L de agua de lluvia recolectada de un puente pavimentado con asfalto. Los parámetros medidos fueron temperatura, pH, turbidez, conductividad, sólidos suspendidos totales (SST), demanda química de oxígeno total (DQOt), demanda química de oxígeno soluble (DQOs), nitrógeno total (NT), $\text{NH}_3\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$, fósforo total (PT) y PT disuelto (DPT). La roca volcánica demostró para este estudio una baja remoción de NT (aproximadamente 15%), $\text{NO}_3\text{-N}$ (cerca de -50%) y PT (20%). La madera presentó una mayor remoción de NT (40%) y $\text{NO}_3\text{-N}$ (aproximadamente 90%), y la

fibra sintética logró remover en mayor proporción el PT (75%). La grava y la roca volcánica fueron más eficientes en la remoción de $\text{NH}_3\text{-N}$ (aproximadamente 75% en ambos casos).

También en Corea, Chen, Park, Niu y Kim (2014), analizaron un sistema a escala piloto de HSSFV para tratar aguas pluviales. Se contó con un tanque separador de sólidos como tratamiento primario y un humedal de flujo vertical con dimensiones de $0,6 \times 0,8 \times 1,1$ m. El sustrato utilizado como medio filtrante fue la roca volcánica, la cual cubre 60 cm de profundidad. Se alimentó el humedal con 120 L de agua pluvial cada 18 a 42 h. Se midió el oxígeno disuelto (OD), la conductividad eléctrica, pH, SST, DQO, NT y PT. Se logró una remoción de un 93% de SST con concentraciones iniciales de 266.1 ± 166.9 mg/L y 45% de DQO con concentraciones iniciales de 169.5 ± 85.8 mg/L. También se logró un 34% de remoción de NT (concentraciones iniciales de 5.88 ± 2.55 mg/L) y un 60% de PT (concentraciones iniciales de 0.46 ± 0.24 mg/L).

En Chile, Seguel (2019) analizó un HSSFH, cuyas dimensiones eran 1×3 m y profundidades de 1 m en la salida y 0,6 m en la entrada. El sustrato usado como medio filtrante fue roca volcánica basáltica y se sembró con *Cortaderia Selloana* (Hierba de las Pampas) y *Typha angustifolia* (La Totorá). En este estudio se midió DQO, fósforo y nitrógeno. Así mismo, se realizó una comparación de densidad, porosidad y absorción entre la RV y grava. El sistema trató agua residual residencial. Las concentraciones iniciales fueron de 210 mg/L a 520 mg/L de DQO, con una remoción de 68% en promedio. Se obtuvo una remoción de 37% del fósforo con concentraciones iniciales entre 17 mg/L a 32 mg/L, y la eficiencia de remoción de nitrógeno fue de 47% con concentraciones iniciales entre 90 mg/L a 130 mg/L. En cuanto a densidad aparente y real, la RV resulta con valores menores, a pesar no ser mucha la diferencia, según lo reportado por el autor la densidad aparente de la RV fue 2201 kg/m^3 versus 1690 kg/m^3 de la grava, mientras que la densidad real de la RV fue 2247 kg/m^3 versus 2492 kg/m^3 de la grava. La porosidad de la RV es mayor respecto a la grava (56% y 41% respectivamente), además, la RV (3%) presentó 60% más absorción que la grava (1,8%). Por tanto, el autor concluye que la RV alcanza o supera la eficiencia de la grava en cuanto a remoción de contaminantes.

El plástico es otro material que tiene mucho potencial para aplicarlo como medio de soporte en HA, sin embargo, su uso en este tipo de tecnologías es poco y, por lo tanto, la información en cuanto a su eficiencia es muy escasa. ECODENA es una empresa española dedicada al tratamiento de aguas residuales, y entre sus productos ofrece un HSSFH con material plástico como lecho filtrante. El material consiste en un plástico esférico de polipropileno isotáctico negro al que llaman ECO LAM y la empresa asegura que el sistema cumple con los parámetros de vertido establecidos por ley (ECODENA, s.f.).

En el país no se han utilizado materiales plásticos como sustrato filtrante en HA, pero se ha probado el uso de tapas plásticas como medio de relleno en un filtro anaerobio de flujo ascendente (FAFA) para tratar agua residual doméstica. Con respecto a las piedras que se utilizan normalmente en un FAFA, el fin de utilizar tapas plásticas fue de aumentar el área superficial de contacto con los microorganismos. Además, como aspectos positivos, según Hegg (2018), las tapas plásticas son un material más poroso y liviano que la piedra. Como resultado logró obtener mejores niveles de remoción de parámetros como demanda biológica de oxígeno (DBO), cuya y sólidos suspendidos totales (SST) con las tapas plásticas (Hegg, 2018). La concentración inicial de DBO fue $403,37 \pm 237,17$ mg/L y la eficiencia de remoción dentro del FAFA estuvo entre 10% y 14%. La concentración inicial de SST fue $107,76 \pm 52,24$ mg/L y la eficiencia de remoción del FAFA fue 12% a 16%.

En cuanto a las plantas, la selección de la vegetación a utilizar en un HA debe realizarse basado en diversas características, entre ellas la profundidad de raíces, la adaptabilidad a medios saturados de agua, resistencia a los contaminantes y capacidad de absorción y asimilación de nutrientes. Esta vegetación, además de sus características propias, también se ve influenciada por las condiciones de operación del humedal, como profundidad del sustrato, turbiedad, caudal, y microbiota del sistema (Bernal, 2014), de manera que el adecuado diseño y manejo de los humedales artificiales es importante para adaptación en el sustrato.

Existen varios tipos de plantas que se pueden utilizar en HA, siendo las plantas acuáticas las más aptas para estos medios. Las plantas se clasifican en emergentes, flotantes y submergentes. En un HA de flujo libre se pueden implementar estos tres tipos de plantas, mientras que en un HFSS solo se pueden colocar plantas emergentes (Hadad, 2018), las cuales desarrollan sus raíces en el sustrato del humedal.

Se considera que lo ideal a la hora de seleccionar la vegetación empleada en un HA es procurar encontrar plantas regionales que se encuentren adaptadas a las condiciones ambientales del lugar donde se construirá el humedal y que sean capaces de sobrevivir a los posibles efectos tóxicos del agua que se tratará. Cada vez se cuenta con un mayor número de especies de plantas capaces de crecer en un HA gracias a las diversas investigaciones que se han llevado a cabo, incluso se pueden utilizar especies ornamentales, arbóreas, e incluso comestibles (Hadad, 2018).

3.6. Características de las Aguas Residuales Con Purines de Cerdo

Las explotaciones ganaderas, principalmente las de índole intensivo, son generadoras de una gran cantidad de estiércol, cuyos componentes pueden ser altamente contaminantes si no se maneja adecuadamente (Moset, 2009). Al residuo sólido y líquido generado por el ganado se le conoce como purín. Por lo general, es una masa con alto contenido de líquido, producida en los encierros de crianza de animales en las fincas ganaderas. González (2005) menciona que los purines se dividen en dos fases: la fase líquida compuesta por agua de lavado y orina de los animales, y la fase sólida conformada por las excretas, restos de alimento y materiales vegetales.

Generalmente los purines tienen altas concentraciones de materia orgánica, nitrógeno y fósforo. Su contenido de nutrientes los ha potenciado para utilizarse como fertilizante al aplicarlos sobre el terreno, por lo que es común encontrar que en las fincas ganaderas se usen de esta manera (Blanco, 2014). No obstante, su aplicación en dosis inadecuadas trae consigo

una serie de problemáticas como la eutrofización de aguas superficiales, acidificación de aguas y suelos, problemas por mal olor, dispersión de antibióticos y contaminación difusa de aguas subterráneas (Moset, 2009).

Los purines de cerdo poseen en su composición macroelementos como N, P y K, microelementos como Mg, Ca y Na y oligoelementos como Cu, Mn, Zn, Fe, S, B y Mo. La fase sólida contiene la mayor parte de la materia orgánica, carbono orgánico, N total, P y metales como Al, Zn, Fe, Cu y Mn, pero la fase líquida también presenta gran contenido de carbono orgánico, materia orgánica, N total (60-75% en su forma amoniacal y el resto es N orgánico) y óxidos de potasio. El fósforo presente en la fase líquida se encuentra en forma de PO_4^{3-} disueltos (Blanco, 2014).

Las aguas residuales de origen porcino suelen estar compuestas por heces y orina de los cerdos, de los cuales las heces corresponden al 55% de la composición de las excretas y la orina al 45%, además de restos de alimento (Gómez et al., 2010). Estas aguas varían su composición según el estado de producción en que se encuentren los cerdos: maternidad y gestación, destete o engorde (Garzón & Buelna, 2014). Sin embargo, existen valores promedio de los parámetros fisicoquímicos debido a que, por lo general, los efluentes de todas las etapas de producción se mezclan.

Existen estimaciones que indican que, por día se generan aguas residuales con 0,25 kg DBO/d y 0,75 kg DQO/d, por cada 100 kg de peso vivo. El pH tiene valores entre 6 y 8. Finalmente, el nitrógeno es el elemento de mayor concentración (Gómez et al., 2010), con cerca de 22 kg/m³ (Blanco, 2014). Los sólidos disueltos tienden a ser >5 g/L, los sólidos totales >25 g/L con un 80% de sólidos suspendidos, alta conductividad eléctrica y elevadas concentraciones de coliformes fecales (González, 2005), esto debido a que la microflora del intestino de los cerdos forma parte de los purines, y gracias a su elevado contenido de nutrientes se favorece el crecimiento de microorganismos e insectos (Moset, 2009).

Por lo tanto, los purines de cerdo pueden verse como un producto con alto valor agregado al utilizarse como un fertilizante natural muy completo, pero su inadecuado manejo

implica altos riesgos ambientales, de manera que el tratamiento de la fase líquida de estos purines es de gran importancia, ya que la fase sólida es mucho más manejable desde el punto de vista agronómico (González, 2005), ya sea transformándola en compostaje, vermicompost, ensilaje como alimento para animales o producción de biogás con posterior tratamiento de lodos. Por ejemplo, para un manejo adecuado de los residuos sólidos y líquidos, en un barrido en seco se puede recoger la excreta para compostarla. Evitando el barrido húmedo de la excreta, se genera un agua residual más favorable para su tratamiento, de manera que se pueda obtener un agua de reúso adecuada, sin implicaciones al ambiente.

3.7. Experiencias Previas en el Uso de Humedales Artificiales en Fincas de producción porcina

Para el caso de aguas residuales de origen porcino, el uso de HA se ha estudiado previamente, obteniendo buenos resultados en sus diferentes configuraciones. Por ejemplo, en Colombia, Gómez et al. (2010) elaboran un sistema de HSSFH a escala para tratar aguas residuales porcinas sin previo tratamiento, utilizando de lecho filtrante 20% de vermiculita, 50% de arena, 10% de arenón chino y 15% de grava, y tres especies de vegetación: *Hedichun montana* (Matandrea), *Brachiaria mutica* (Pasto pará) y *Brachiaria arrecta* (Pasto taner). Obtuvieron mejores resultados con el humedal plantado con Matandrea, donde la remoción de DBO fue superior al 80%, la remoción de SST y nitrógeno fue de más de 90% y la remoción del fósforo fue de 90%. Las concentraciones iniciales de DBO, SST, NT y P fueron 116,1 mg/L, 3444 mg/L, 392 mg/L y 116,2 mg/L, respectivamente.

Otro estudio de HA para tratamiento de aguas porcinas es el de Udom, Mbajjorgu & Oboho (2018), en Nigeria, donde desarrollaron un sistema de HSSFH a escala piloto utilizando arena gruesa como medio de soporte y de vegetación colocaron *Pennisetum clandestinum* (PC) y *Pennisetum purpureum* (PP). Concluyeron que las mayores tasas de remoción de los parámetros fisicoquímicos se lograron con PC con valores 66,53% para DBO

cuya concentración inicial varió entre 102,4 mg/L y 162,3 mg/L, 44,85% para DQO con valores iniciales de 165,16 mg/L a 220,40 mg/L, 61,63% para SST (valores de entrada de 195,7 ±24,3 mg/L) y 62,49% para nitrógeno total con valores iniciales entre 21,9 mg/L y 38,7 mg/L.

Por otro lado, Borin, Politeo & De Stefani (2013), en Italia, evaluaron la eficiencia de un sistema híbrido de humedales artificiales previamente construido en una finca de producción porcina constituido por tres HSSFV colocados en paralelo y un HSSFH colocado en serie con estos. Como pretratamiento contaban con un tanque de almacenamiento, un separador mecánico con malla giratoria de 120 µm para separar la fase líquida y sólida, un reactor biológico aeróbico y un tanque de sedimentación subterráneo. El primer humedal vertical utilizó grava lavada y se plantó con *Canna indica* L., el segundo utilizó el mismo material, pero se plantó con *Symphytum officinale* L., y el tercero se plantó con la misma especie que el segundo, pero como material filtrante utilizó grava, arena gruesa y zeolita, mientras que el humedal horizontal utilizó grava y se plantó con *Phragmites australis* (Cav.) Trin ex. Steudel (caña común). Las concentraciones del afluente eran 1125 mg DQO/L, 671 mg NT/L, 390 mg NH₄-N/L, y 23 mg PT/L. En este estudio lograron determinar que la mayor eficiencia de depuración se alcanzó en DQO (79%), NT (64%) y NH₄ – N (63%), además se logró remover un 61% de PT. Los autores también mencionan que el HSSFH fue más eficiente que los verticales en cuanto a la remoción de DQO.

González et al. (2015), en España, analizaron un HSSFH colocado como tratamiento posterior a un separador de fases y que consta de 3 celdas de 27 m x 2,5 m y 1 m de profundidad con diferentes capas de grava y plantados con *Phragmites australis*. Evaluaron 2 TRH distintos: 7 días y 3 días, y observaron que se logró una eliminación de DQO de 34,8% y 12,9%, para NH₄-N fue de 38,2% y 13,8% respectivamente, logrando mayores remociones de estos contaminantes para el TRH de 7 días, mientras que para la eliminación de PT se obtuvo que para TRH de 7 días fue de 14% y para TRH de 3 días fue 40,5%, logrando la mayor remoción de PT con este último. Las concentraciones de entrada para TRH de 7 días fueron 5123,3 ± 1048,9 mg DQO/L, 0,8 ± 0,1 g NH₄-N/L y 67,4 ± 18,8 mg PT/L, mientras

que para TRH de 3 días fueron de $4372,2 \pm 340,4$ mg DQO/L, $0,9 \pm 0,03$ g $\text{NH}_4\text{-N/L}$ y $73,9 \pm 13,7$ mg PT/L. Concluyendo que, en general, se lograron mayores eficiencias con el TRH de 7 días.

También en España, Blanco (2014) analizó la depuración de purines de cerdo con HA, utilizando un sistema piloto con 3 unidades de 3 m x 2,3 m y 0,5 m de profundidad y dispuestas en serie. Los purines tratados fueron diluidos previamente en un depósito de 1 m³. La primera unidad era un HFS con un lecho de grava y plantado con *Typha latifolia*, y las otras dos unidades eran de flujo subsuperficial, lecho de grava y plantadas con *Salix atrocinerea*, el TRH es de 8 días. El pH medio medido fue de 7,5 en el sistema piloto, las concentraciones del afluente fueron $380,1 \pm 181,4$ mg DQO/L, $88,2 \pm 69,9$ mg $\text{NH}_4\text{-N/L}$, $19,7 \pm 9,0$ mg PT/L y $230,1 \pm 145,2$ mg SST/L. Lograron determinar que para el caso de los HFSS se obtuvo una eliminación de $(35,5 \pm 28,1)\%$ de DQO, $(29,0 \pm 32,3)\%$ de $\text{NH}_4\text{-N}$ y $(45,8 \pm 31,1)\%$ de PT, sin embargo, para el caso de SST la remoción fue muy variable y el valor medio fue de $(-37,6 \pm 160,6)\%$.

En Perú, Sifuentes (2018) también analizó el tratamiento de purines de cerdo con HSSFH colocados en paralelo con el fin de evaluar la eficiencia de *Nasturtium officinale* en dos etapas de crecimiento (2 y 4 meses) para tres distintos TRH (12 h, 24 h y 36 h). Las dimensiones de las unidades son de 1 m x 0,5 m y 0,4 m de profundidad, y el tratamiento previo del efluente es una fosa séptica. Las concentraciones de entrada fueron 316 mg $\text{DBO}_5^{20}/\text{L}$, 283 mg NT/L, 50 mg PT/L. Bajo estas condiciones se logró un 68% de remoción de DBO_5 , 88% de NT y hasta 98% de PT para un TRH de 24 h con plantas de 4 meses de edad.

De manera que, es posible concluir de estas investigaciones que los HA representan una alternativa eficiente en el tratamiento de purines de cerdo en tanto se seleccione un adecuado sustrato y vegetación, además de que los TRH mayores tienden a mejorar la eficiencia del tratamiento. También es importante mencionar que, por lo general estos

sistemas funcionan mejor cuando hay un pretratamiento de por medio que contribuya a reducir las altas concentraciones de nutrientes presentes en las excretas porcinas.

3.8. Normativa Costarricense de Aguas Residuales en Granjas Porcinas

En Costa Rica se cuenta con 14355 fincas de producción porcina, según el censo agropecuario 2014, de las cuales 10912 no dan tratamiento a los residuos (Instituto Nacional de Estadísticas y Censos, 2014), por lo que no cumplen con las leyes y reglamentos del país, entre los cuales se pueden citar el “Reglamento de Granjas Porcinas N° 32312”, la “Ley General de Salud N° 5395”, “Reglamento de Vertido y Reúso de Aguas Residuales N° 33601”, “Ley de Conservación de Vida Silvestre N° 7317”, “Ley Orgánica del Ambiente N° 7554”, y el Decreto N° 25558-S-MINAE. Este decreto establece los requisitos para la operación de sistemas de tratamiento de aguas residuales en las granjas porcinas.

En el Reglamento de Vertido y Reúso de Aguas Residuales se establecen los límites máximos permitidos para los parámetros de análisis obligatorio en aguas residuales efluentes de fincas porcinas vertidas en un cuerpo receptor, los cuales se detallan en la Tabla 1. En caso de que el agua residual sea destinada a reúso, algunos límites se cambian en función del tipo de reúso. En el caso de la finca Linda Vista, se plantea la posibilidad de un reúso tipo 5, el cual es un reúso agrícola en cultivos no alimenticios como pastos y forrajes. Por tanto, parámetros como DBO_5^{20} , DQO y SST cambian, como se muestra en Tabla 1. En el caso de reúso tipo 5 se eleva el límite máximo de DBO_5^{20} a 400 mg/L, el de DQO a 1000 mg/L. y SST a 200 mg/L.

Entre los parámetros mencionados en la Tabla 1 se encuentran dos tipos de parámetros diferentes, los físicos y los químicos, y todos ellos son indicadores del estado de contaminación del agua. Entre los parámetros físicos se encuentra la temperatura, sólidos suspendidos y sólidos sedimentables.

La temperatura se considera importante porque de ella depende la vida de los microorganismos y además tiene relación con la cantidad de oxígeno disuelto que hay en el agua, generalmente, las aguas con menor temperatura contienen más oxígeno (Sifuentes, 2018). La temperatura se ve influenciada por factores como el pH, la concentración de sales, la provisión de nutrientes y los productos metabólicos de los microorganismos (Rojas, 2005).

Los sólidos suspendidos totales (SST) son aquellos que se mantienen disueltos en el agua a lo largo del tiempo, mientras que los sólidos sedimentables son los que después de pasado un tiempo tienden a precipitar y formar un sedimento, por lo que son más fáciles de separar. Un parámetro que permite hacerse una idea de la cantidad de sólidos en el agua es la turbidez, que mide la cantidad de partículas en suspensión en el agua, es decir, entre mayor es la turbidez, menor es el paso de la luz visible y mayor la cantidad de sólidos en suspensión (Sifuentes, 2018).

En cuanto a los parámetros químicos, los de mayor relevancia son el potencial de hidrógeno (pH), la demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5^{20}), la demanda química de oxígeno (DQO), el nitrógeno y el fósforo totales. El pH es la concentración del ion hidrógeno en líquidos y se utiliza para medir su neutralidad (Sifuentes, 2018). Este factor ejerce una influencia en el crecimiento y reproducción de los microorganismos en un medio, ya que se relaciona con la acidez o alcalinidad del líquido (Rojas, 2005).

Tabla 1. Límites máximos permisibles para los parámetros universales de análisis obligatorio de aguas residuales (Reglamento de Vertido y Reúso de Aguas Residuales Decreto N° 33601-MINAE-S, 2007).

Parámetro	Límite para Vertido en Cuerpo Receptor	Límite para aguas de origen porcino vertidas en Cuerpo Receptor	Límite para reúso tipo 5 de aguas de origen porcino
DBO_{5,20} (mg/L)	50	200	400
DQO (mg/L)	150	500	1000
Sólidos suspendidos (mg/L)	50	200	400
Grasas/aceites (mg/L)	30	30	30
Potencial hidrógeno	5 a 9	5 a 9	5 a 9
Temperatura (°C)	$15 \leq T \leq 40$	$15 \leq T \leq 40$	$15 \leq T \leq 40$
Sólidos sedimentables (mL/L)	1	1	1
Sustancias activas al azul de metileno (mg/L)	5	5	5
Fosfatos (mg/L)	25	25	25
Nitrógeno total (mg/L)	50	50	50

La DBO₅²⁰ es una medida de la cantidad de oxígeno consumido por los microorganismos durante los procesos de oxidación de la materia orgánica. El subíndice y superíndice de la abreviatura indican que la prueba considera valores a partir del día 5 al 20, bajo una incubación controlada a una temperatura de 20 °C. Mientras que la DQO, además de considerar el oxígeno consumido por los MO durante los procesos de oxidación de la materia orgánica, también considera la cantidad de oxígeno requerido por un agente químico oxidante para degradar otros compuestos en el agua. Por esta razón, la DQO siempre tiende a ser un valor mayor al de la DBO₅²⁰ (Blanco, 2014).

En cuanto al nitrógeno total, es medido y regulado en la legislación debido a que un exceso de este elemento puede generar la eutrofización y generación de algas al igual que el exceso de fósforo, lo que provoca una disminución del oxígeno disuelto en el agua (Sifuentes, 2018), por lo que se debe asegurar que las aguas que van a desembocar en cuerpos de agua naturales cumplan con los límites establecidos y evitar problemas medioambientales.

4. METODOLOGÍA

4.1. Evaluación de las Condiciones de Producción y Manejo de Residuos de la Finca

4.1.1. Área de estudio

Las aguas residuales generadas corresponden al área de producción porcina de la finca Linda Vista, localizada en Calle Vargas de Santa Cruz de Turrialba, a una latitud 9°58'51" N y longitud 83°43'38" O, con una altitud de 1664 msnm. La finca cuenta con capacidad para manejar un aproximado de 200 cerdos en total, sin embargo, se suelen mantener de 70 a 100 cerdos durante el año. La finca tiene un sistema de producción continua desde el nacimiento, engorde, reproducción y venta por peso vivo. Por tanto, la cantidad varía conforme nacen cerdos y envían animales ya con peso de producción.

El clima donde se ubica la finca Linda Vista es de tipo subtropical húmedo y predominan las temperaturas frescas, abundantes lluvias y días nubosos. La temperatura promedio de la zona oscila entre 10 y 19 °C, y la precipitación anual es de 3000 a 3500 mm. En la Figura 3 se muestra la finca, en particular la ubicación de las porquerizas y el punto donde se establecieron los humedales pilotos.

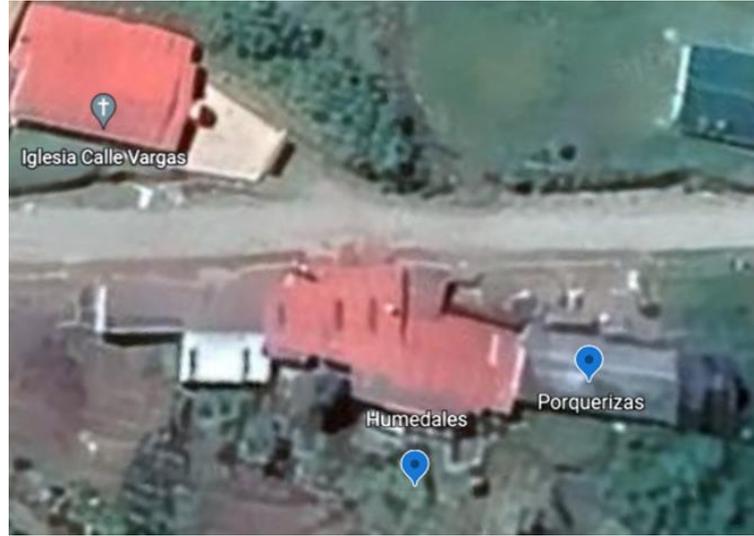


Figura 3. Vista satelital de la finca Linda Vista.

Los humedales a escala piloto se colocaron bajo una estructura de techo con plástico transparente para poder tener condiciones controladas de precipitación, además se debió añadir una capa de sarán negro de 50% sombra en el techo para proteger la estructura del viento. En la Figura 4 se muestra la manera en que se colocó el sarán y en la Figura 5 se muestra la estructura, una vez colocado el plástico. Con el fin de conocer las condiciones de clima en la zona de estudio, se midió la temperatura y humedad relativa en el lugar mediante sensores marca HOBO y se colocó un pluviómetro para medir la cantidad de agua de lluvia que puede influir en el tratamiento a escala real. Además, se colocaron los humedales a escala piloto a una distancia de 15 m de las porquerizas para poder tener una mejor accesibilidad debido a la topografía de la finca.



Figura 4. Estructura de techo con sarán negro 50% de sombra.



Figura 5. Estructura de techo con plástico transparente para invernadero.

4.1.2. Condiciones iniciales en el sistema de producción y manejo de residuos

Se realizó una inspección de la infraestructura donde se mantienen los cerdos, revisando la condición de los pisos, paredes, techos y drenajes de las instalaciones. Además, se describe el manejo de la limpieza y la disposición de residuos orgánicos que usualmente realizan en la porqueriza. Con base en la información colectada, se elaboró una guía para producción más limpia en la finca Linda Vista (Anexo D), donde se indican las medidas que se recomienda llevar a cabo previo al diseño e inicio de la construcción de los sistemas de tratamiento de agua residual. La guía siguió como referencia el Reglamento de granjas porcinas del Ministerio de Agricultura y Ganadería.

Con el fin de determinar si las medidas indicadas en la guía fueron implementadas, en particular la práctica de limpieza de la porqueriza, se realizaron 27 mediciones (3 por día) del caudal que sale de la manguera utilizada para el lavado de las camas de los cerdos. El caudal se determinó con el método volumétrico con el fin de caracterizar la cantidad de agua utilizada por día, la cual se convierte en agua residual a tratar.

Se midió el tiempo que tardaba la persona encargada de lavar las porquerizas y se calculó el consumo total de agua en esa labor. Así mismo, se realizó el barrido en seco de las excretas y restos de alimento, se recolectaron los sólidos usando una pala y se volvió a medir el tiempo que tarda el encargado en realizar el lavado de las porquerizas, para determinar si hubo disminución del consumo de agua al aplicar el barrido primero, para lo cual se realizaron otras 27 mediciones (3 por día). Las mediciones realizadas posterior a la implementación de la guía sirvieron para establecer criterios de diseño como lo son caudal y concentración de contaminantes en el agua residual. Cabe destacar que se capacitó al operario de la finca encargado de las porquerizas para realizar las mediciones de caudal, barrido en seco y pesaje de sólidos recolectados, así como en la metodología para el secado y compostaje de sólidos, ya que la continuación de estas prácticas queda bajo su responsabilidad.

4.1.3. Diseño del sistema de separación de sólidos

Debido a las características de caudal y concentración de contaminante, fue necesario implementar un sistema de separación de sólidos. Este sistema recibe las aguas residuales producto del lavado del piso de la porqueriza. El sistema consistió en una tina tipo bebedero rectangular de 0,5 m³ y 2 tanques IBC de 1 m³ cada uno, los cuales se colocaron en serie y funcionan como unidades de separación de sólidos en suspensión. En la Figura 6 y 7 se muestran imágenes de estos contenedores. Para la colocación de la tina tipo bebedero se limpió el terreno, se compactó y se niveló para poder fijarla en un punto donde se logra captar mediante tuberías las aguas residuales provenientes de la porqueriza, esta funciona como primer receptor y permite la suspensión de sólidos finos como los restos del concentrado con que se alimenta a los cerdos.



Figura 6. Tina tipo bebedero horizontal (La Casa del Tanque, 2022a).



Figura 7. Tanque IBC de 1 m³ (La Casa del Tanque, 2022b).

La tina tipo bebedero se encuentra en un punto más elevado que el lugar donde se colocaron los tanques IBC para así mover el agua de la tina hacia los tanques mediante gravedad, en el Anexo A y B se puede observar el plano de la finca y el diagrama del sistema de tratamiento implementado, respectivamente.

El lugar destinado para la colocación de los tanques IBC fue el fondo de un tanque de concreto previamente construido en la finca, del cual fallaron sus paredes al no soportar la presión del agua, de manera que se botó una de las paredes y se aprovechó el espacio. Con el fin de que una tanqueta quede más elevada que la otra se colocó una calza de concreto utilizando la misma pared derribada como piso, de esa forma el agua del primer tanque logra pasar al segundo por gravedad. En la Figura 8 es posible observar la ubicación de estos tanques para una mejor comprensión. Cada uno de los tanques funciona como unidades donde se precipita la mayoría de los sólidos de mayor tamaño y el agua sale por la parte superior, reduciendo así la carga orgánica de la misma.



Figura 8. Ubicación de los tanques IBC.

Para conectar todo el sistema se utilizó tubería sanitaria de PVC de 4 pulgadas, dentro de los tanques IBC se colocaron tes y tubo sanitario de PVC, tanto a la entrada como a la salida para evitar turbulencia y favorecer la sedimentación de sólidos. Se dejó una distancia de 40 cm del fondo del tanque hasta la tubería de entrada y de salida. Véase la Figura 9 para mayor comprensión de la disposición de estas tuberías.

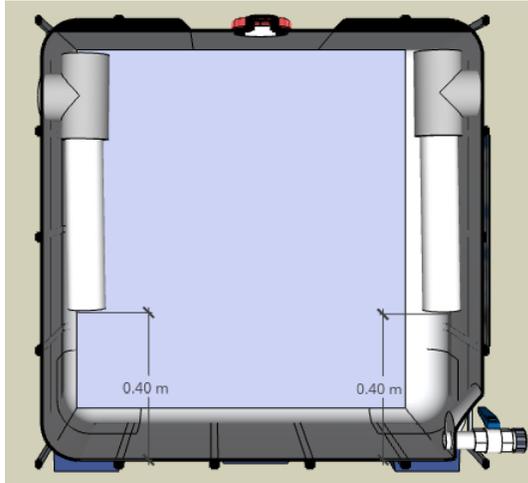


Figura 9. Diagrama de colocación de tuberías de entrada y salida en tanques IBC sedimentadores.

4.2. Primera Etapa Experimental: Sistema de Humedales a Escala Piloto

4.2.1. Conformación de unidades piloto

Se cuenta con tres sistemas individuales de HSSFV a escala piloto. Cada sistema representa un tratamiento diferente y está constituido por tres repeticiones colocadas en paralelo, teniendo un total de 9 unidades de humedales. Cada tratamiento consiste en un medio filtrante diferente: basalto, tapas plásticas y piedra de río.

En cuanto a los materiales que constituyen los humedales, se utilizaron 9 cajas de plástico de 0,59 m de alto y un área superficial de $0,33 \text{ m}^2$, cuyas dimensiones se pueden observar en detalle en el diagrama de la Figura 10. Para los sistemas de drenaje de los humedales, se utilizó tubería de PVC de $\frac{3}{4}$ de pulgada y se cortó de acuerdo con las dimensiones de las cajas, se le agregaron los accesorios como codos, tes, cruces y válvulas, además se elaboraron los orificios por los que drenaría el agua. Estos orificios son de $\frac{1}{8}$ pulgada, ordenados en 4 filas paralelas distribuidas longitudinalmente al tubo, se hicieron 4

orificios por cada 100 mm de largo. En la Figura 11 se pueden observar las distribuciones mencionadas.

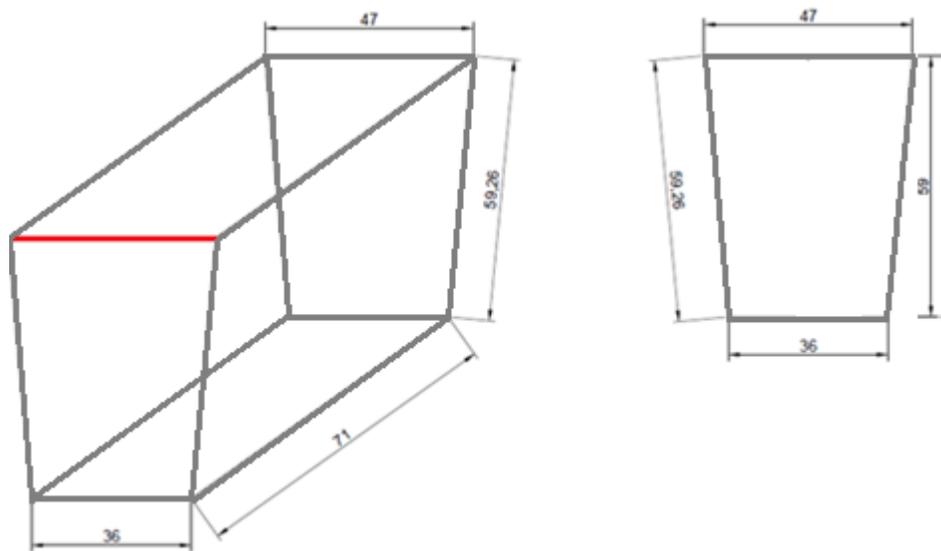


Figura 10. Diagrama de dimensiones de las unidades piloto (dimensiones en cm).



Figura 11. Distribución de orificios en tubería de drenaje para humedales piloto.

A continuación, se describen los materiales utilizados para la elaboración de las distintas capas que conforman los HA:

- a. Todos los sistemas de tubería de drenaje fueron recubiertos con un geotextil cuya función es filtrar las partículas grandes como la arena (con una granulometría de 0-1 cm).
- b. En la parte inferior de todas las unidades se colocaron 0,12 m de canto rodado de río cubriendo los sistemas de drenaje.
- c. Para los medios filtrantes que diferencia a cada tratamiento se estableció una altura de 0,30 m para cada uno:
 - c.1. Piedra basáltica (diámetros de 0,5-2,5 cm)
 - c.2. Piedra cuarta de río (diámetros de 0,75-3,8 cm)
 - c.3. Tapas plásticas (diámetros de 1,24-9 cm)
- d. Sobre el medio filtrante de cada unidad se añadieron dos capas de sarán negro de 80% de sombra para evitar traslapes con la capa superior.
- e. En la parte superior de todas las unidades se colocaron 17 cm de arena de río para poder darle un mayor sostén a las plantas.
- f. En cada unidad se plantaron dos estacas de Botón de Oro (*Tithonia diversifolia*), ya que es una planta con una alta adaptabilidad a condiciones climáticas del lugar y es utilizada como forraje para ganado.

La altura de cada capa filtrante se estimó realizando un ajuste al modelo empleado por Venegas (2020), según las dimensiones de las cajas plásticas que se utilizaron en este caso. En la Figura 12 se muestra la distribución de las capas en cada sistema de humedales, y en la Figura 13 se aprecia cómo fueron colocadas las primeras capas. Las estacas de Botón de Oro se sembraron cada una a 0,16 m y 0,55 m del borde marcado con rojo en la Figura 10. Una vez establecidos los sistemas con plantas, se regaron inicialmente con agua potable

durante un mes para asegurar que se adaptaran. Posteriormente se inició el riego de cada humedal con el agua residual proveniente de los tanques IBC.

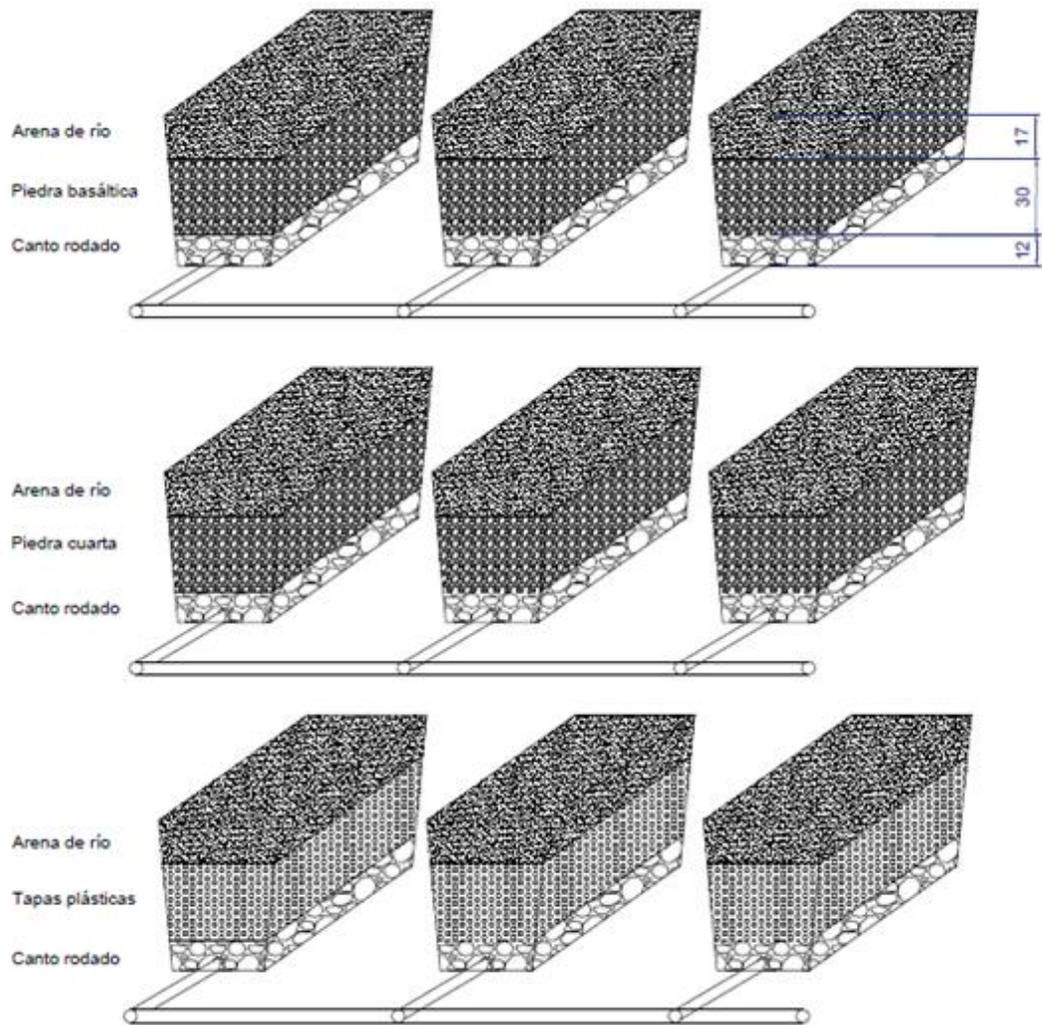


Figura 12. Distribución de capas en los humedales (dimensiones en cm).



Figura 13. Colocación de primeras capas de material filtrante en humedales piloto

Se determinó la porosidad de los sustratos mediante el método volumétrico, utilizando una mezcla entre los sustratos en estudio y la arena de río, correspondientes a las primeras capas que conformarán los humedales.

Para cada humedal a escala piloto se implementó un sistema de riego para verter el agua residual. Se utilizaron baldes de 10 litros colocados en serie mediante tubería de PVC de $\frac{1}{2}$ pulgada a la mitad de su altura para que el agua pasara de un balde a otro, asegurando el caudal diario de diseño, como se muestra en la Figura 14. Estos baldes, contaron con una tubería de salida de $\frac{1}{2}$ pulgada conectada a una válvula de alivio para control de los tiempos de riego.



Figura 14. Conexión de sistema de abastecimiento de humedales con tubería PVC.



Figura 15. Sistema de tubería de PVC para la aplicación de riego en los humedales piloto.

Cada válvula se conectó a una tubería de PVC de ½ pulgada de 0,62 m de largo y 0,36 m de ancho. La tubería de riego constaba de tres ramales, como se puede observar en la Figura 15, con 4 orificios de 1/8 de pulgada cada 100 mm de largo por los que se liberaba el agua residual de manera uniforme. Para la obtención de muestras del agua tratada en las unidades piloto, se colocó una válvula de ¾ de pulgada conectada al sistema de drenaje (ver Figura 15).

4.2.2. Condiciones de operación de los humedales piloto

Para lograr determinar las condiciones en las que se encontraba el agua que iba a ingresar a los humedales fue necesario caracterizar el agua residual que sale de las porquerizas durante el lavado. Una muestra fue tomada antes de aplicar la medida recomendada de barrido en seco y la otra después de implementarlo. Estas muestras fueron analizadas en el laboratorio de Investigaciones Varias de la Escuela de Ingeniería de Biosistemas, donde se midió DQO utilizando el reactor HACH DRB 200 y el colorímetro HACH DR 900 para aguas residuales bajo el Método 8000 del Manual de Análisis de Agua (HACH Company, 2000).

De esta manera fue posible tener una aproximación de la concentración de materia orgánica presente en los purines de los cerdos que se desean tratar. Además, sirvió para evidenciar los beneficios de aplicar la guía generada, en particular, en los procesos de limpieza del piso de la porqueriza. También se muestreó el agua residual que sale de los tanques IBC para determinar la concentración del contaminante, DQO en este caso, que tiene el agua que van a recibir los humedales a escala piloto. Con el dato de caudal y concentración, se puede determinar la carga orgánica que ingresa a cada humedal utilizando la ecuación 1. La ecuación 2 se utiliza para determinar la carga hidráulica que ingresa a cada humedal.

$$B_i = \frac{(Q * C_i)}{(1000 * A)} \quad [1]$$

$$CH = \frac{(1000 * B_i)}{C_i} \quad [2]$$

Donde, Q es el caudal diario (L/d), A es el área superficial de cada humedal (m²), B_i es la carga orgánica superficial del contaminante i (g/m²/d), C_i es la concentración del contaminante i (g/m³), y CH es la carga hidráulica (mm/d). Como los humedales piloto son cajas compradas, ya se conoce el área superficial.

La carga orgánica real del agua de entrada a los humedales se utiliza para chequear si la misma es menor o igual a 20 g DQO/m²/d. Esto por recomendaciones de no alimentar un HSSFV con una carga mayor a 20 g DQO/m²/d (Salas, 2017).

Otro parámetro a chequear al implementar HA es el tiempo de retención hidráulico (TRH) (ecuación 3). El TRH corresponde al tiempo que le tomará al efluente atravesar todas las capas del humedal y para su cálculo se necesita conocer la porosidad del sustrato, el volumen del humedal, y el caudal diario. En humedales artificiales el TRH recomendado es de 3 a 7 días para asegurar el tratamiento del agua residual.

$$TRH = \frac{(\varepsilon * V)}{Q} \quad [3]$$

Donde, TRH (d), ε es la porosidad (decimal), V es el volumen del humedal (m³), y Q es el caudal diario (m³/d).

4.2.3. Muestreos y caracterización de aguas en las unidades piloto

Se realizaron muestreos del agua a la entrada y salida de cada uno de los sistemas de humedales piloto cada dos días durante un período de 4 meses (abril-julio, 2022). Se obtuvo una muestra del agua de entrada y 9 muestras del agua de salida correspondiente a cada unidad, para un total de 10 muestras por día. Cada día se extrajo 5 L de cada muestra y éstos se almacenaron en refrigeración a 4 °C hasta el momento de ser analizados.

A cada muestra se le midió turbidez, pH, temperatura, conductividad eléctrica y sólidos sedimentables (SSed) *in situ*. Para la turbidez se utilizó un turbidímetro de la marca Oakton modelo T-1 y una vez analizada la muestra se lavó cada vial con agua destilada y jabón líquido para evitar la contaminación entre muestras.

La conductividad eléctrica y la temperatura se obtuvo con un medidor digital de conductividad portátil de la marca Hanna modelo HI98304, el cual también brinda los datos de temperatura del agua. Luego de cada uso se lavó el instrumento con agua potable. Lo mismo se realizó a la hora de medir el pH, para lo cual se empleó un medidor de pH digital portátil. Los SSed se midieron utilizando conos Imhoff, para lo cual se utilizó 1 L de cada muestra y se dejó reposar por 45 minutos cada una, se removieron las paredes con una varilla plástica y se reposó por 15 minutos más antes de hacer la lectura.

De las muestras almacenadas en refrigeración, se tomó 1 L de cada una para realizar las pruebas químicas necesarias para determinar la concentración de contaminantes. Para este análisis se midió DQO, nitratos, nitrógeno amoniacal y fosfatos.

En el caso de la DQO se realizó con el método descrito anteriormente, con diluciones 10:1. Para medir nitratos se utilizó el Método 8039 correspondiente a la reducción con cadmio, con diluciones 100:1; para obtener el nitrógeno amoniacal se usó el Método 8155, el cual utiliza silicato y se debieron realizar diluciones 1000:1, y, por último, para obtener la cantidad de fosfatos se implementó el Método 8048 (Método PhosVer 3) con diluciones 150:1.

4.2.4. Remoción de contaminantes

Para determinar si hubo un tratamiento del agua residual por parte de los humedales, se calculó un promedio de los valores de salida de las tres repeticiones de cada tipo de tratamiento en estudio para cada parámetro de agua analizado. Se denominó tratamiento 1 a las tapas plásticas, tratamiento 2 a la piedra de río y tratamiento 3 a la roca volcánica y con el promedio obtenido se procedió a calcular, mediante la ecuación 4, el porcentaje de remoción de cada contaminante por tratamiento.

$$\%remoción = \left(\frac{C_e - C_s}{C_e} \right) * 100 \quad [4]$$

Donde, C_e es la concentración del agua de entrada (mg/L), y C_s es la concentración del agua de salida (mg/L).

Posterior a la obtención del porcentaje de remoción se comparó los resultados de cada parámetro con los valores estipulados en el Reglamento de Vertido y Reúso de Aguas Residuales para determinar si los tratamientos lograron que el agua de salida cumpla o no con la legislación de vertido de aguas residuales en cuerpos de agua y reúso tipo 5 (Ver Tabla 1).

4.2.5. Crecimiento de las plantas

Se sembraron estacas de *Tithonia diversifolia*, nombre común Botón de Oro, que contuvieran al menos dos nudos, sembrando dos estacas por humedal, como se explica en el punto 4.2.1. Estas estacas se sembraron de manera horizontal y se regaron con agua potable durante un mes y luego se inició el riego con agua residual. Al momento de iniciar el riego

con agua residual se eliminaron los tallos ya crecidos para iniciar desde cero y se dejaron solamente las yemas que estaban naciendo en las estacas sembradas.

Se midió el largo de los tallos conforme iban creciendo y se realizó un conteo de hojas, cada 15 días. En los casos en que se tuvo pérdida de las plantas, se decidió volver a sembrar estacas nuevas y continuar con el procedimiento.

4.2.6. Análisis estadístico

Para realizar el análisis estadístico de los datos se utilizaron las medianas de los resultados. En total se contó con 9 variables experimentales, 1 variable independiente (tipo de sustrato) y 8 variables dependientes (DQO, SSed., Temperatura, pH, turbidez, conductividad eléctrica, nitratos, nitrógeno amoniacal y fosfatos). Se utilizó software InfoStat v.2016L. para realizar la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk modificado ($\alpha = 0,05$) y los análisis de varianza a los datos obtenidos para cada muestra.

Las variables que presentaron un comportamiento normal de los datos se les realizó un análisis paramétrico de varianza (ANOVA) con una prueba de Tukey. En aquellos casos donde no se tuvo una normalidad de los datos, se procedió con un análisis de varianza no paramétrico, en este caso una prueba de Kruskal-Wallis realizando comparaciones de a pares. Se plantearon dos evaluaciones, la hipótesis nula de la primera consiste en que no existen diferencias significativas entre la caracterización del agua de entrada y el agua de salida de los tratamientos. Mientras que la segunda hipótesis nula es que no existen diferencias significativas para los parámetros de respuesta entre los tratamientos con los distintos sustratos estudiados. Además, se realizaron gráficos de cajas (boxplot) para una mejor visualización de los resultados.

4.3. Segunda Etapa Experimental: Humedal a Escala Real

4.3.1. Diseño de tren de tratamiento a escala real para la Finca Linda Vista.

4.3.1.1. Humedal Artificial Subsuperficial de Flujo Vertical.

Basado en los resultados obtenidos en la primera etapa experimental se seleccionó el tipo de tratamiento que otorgó una mayor eficiencia en la remoción de contaminantes para la mayoría de los parámetros medidos.

Se diseñó un humedal artificial a escala real utilizando la ecuación 5 para determinar el área superficial requerida para las celdas que conformarán el humedal de modo que pueda tratar todo el caudal generado en la finca Linda Vista, según el modelo de caja negra de flujo de tapón modificado $k-C^*$ elaborado por Kadlec & Knight (1996).

El modelo de flujo de tapón modificado es un modelo matemático que asume que existe una concentración residual de un contaminante, denominada C^* , que se considera como un ajuste empírico y permite calcular el área superficial de un humedal artificial con la siguiente ecuación:

$$A_s = \frac{Q_d}{K} \ln \left(\frac{C_i - C^*}{C_f - C^*} \right) \quad [5]$$

Donde, A_s es el área superficial (m^2), Q_d es el caudal diario de diseño (m^3/d), C_i es la concentración inicial del contaminante (mg/L), C_f es la concentración final del contaminante (mg/L), C^* es la concentración residual o base y K es una constante que varía con la temperatura y la porosidad del sustrato.

Venegas (2020) utiliza la ecuación 6 para el cálculo de la concentración base C^* de los contaminantes en HSS según recomendaciones bibliográficas de investigaciones previas, por lo que se optó por replicar este método en el presente proyecto.

$$C^* = 3,5 + 0,053 C_i \quad [6]$$

De acuerdo con la temperatura promedio medida con los sensores HOBO se calculó el valor de K con el método especificado por UN-HABITAT (2008) para diseño de humedales construidos tanto de flujo vertical, como de flujo horizontal (ecuación 7), y una vez obtenida el área superficial requerida, se estableció la relación entre dimensiones para determinar la medida del largo y el ancho del humedal. La profundidad se preestableció en 0,17 m según recomendaciones en la literatura.

$$K = K_T dn \quad [7]$$

Donde $K_T = K_{20} (1,06)^{(T-20)}$, K_{20} es una constante dada a 20 °C (1,1 d⁻¹), T es la temperatura operativa del sistema (°C), d es la profundidad del humedal (m) y n es la porosidad del sustrato en decimales.

Se calculó el volumen del humedal con el producto del área superficial y la profundidad y se utilizó ese valor para establecer el TRH del sistema con la ecuación 3, utilizando la porosidad del sustrato con mayor eficiencia en la remoción de contaminantes.

Para proteger el humedal artificial, se diseña una trampa de grasa y un tanque séptico para remoción de grasas, sólidos y materia orgánica. El tren de tratamiento propuesto consiste entonces de una trampa de grasa seguida por un tanque séptico, ambos ubicados antes del humedal. El diseño de la trampa de grasa y el tanque séptico se realizó de acuerdo a las indicaciones señaladas en el Código de Instalaciones Hidráulicas y Sanitarias en Edificaciones (CFIA, 2017), de la siguiente manera:

4.3.1.2. Trampa de grasa

- TRH no debe ser menor a 24 minutos.
- Profundidad debe ser al menos de 0,80 m.
- Espacio entre nivel de líquido y superficie de la trampa debe ser al menos de 0,20 m.
- Relación entre dimensiones debe ser 2:1 o 3:2.
- Se debe contar en la salida con una cámara para toma de muestras del efluente para realizar análisis.
- La unión en T de entrada se extenderá en el líquido en al menos un 25%.
- La unión en T de salida se extenderá en el líquido en al menos un 50%.

4.3.1.3. Tanque séptico

Para el diseño de tanques sépticos, el código establece que se debe seguir el método racional, para el que se debe calcular el volumen total de líquidos (V_L) como la suma de volúmenes para sedimentación, biodigestión y almacenamiento de lodos digeridos (ecuación 11). El volumen para sedimentación en metros cúbicos se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$V_s = 10^{-3} P * q * t_h \quad [8]$$

Donde, P es la cantidad total de personas (en este caso animales) por atender, q es el caudal de aguas por tratar (L/persona/día) y t_h es el tiempo de retención hidráulica para este proceso (días).

El volumen para biodigestión en metros cúbicos se calculó con la ecuación 9 y el volumen para el almacenamiento de lodos digeridos, en metros cúbicos, se determinó con la ecuación 10.

$$V_d = 0,5 \times 10^{-3} * P * t_d \quad [9]$$

$$V_a = 10^{-3} r P \left(n - \left(\frac{t_d}{365} \right) \right) \quad [10]$$

$$V_L = V_s + V_d + V_a \quad [11]$$

Donde, P es el número total de animales por atender, n es el período entre limpiezas o remoción de lodos (años), t_d es el tiempo de retención para la biodigestión ($t_d = 28(1,035)^{35-T}$) (días), en función de la temperatura, y r es un factor que caracteriza las aguas (r=30L/persona/día).

Además, de acuerdo al Artículo 10.2-20 del código, se establecen las siguientes condiciones:

- La relación entre dimensiones debe ser de 3:1.
- La profundidad útil de líquidos deberá estar entre 1 m y 2,5 m.
- El tiempo hidráulico para sedimentación no debe ser menor a 24 horas.
- El período entre limpiezas no debe ser menor a 2 años ni mayor a 5 años.
- Mantener una diferencia de niveles de 0,07 m entre el fondo de la tubería de entrada y el fondo de la tubería de salida, siendo la tubería de salida la más baja.
- La unión en T de salida se extenderá en el líquido en un 40% de la profundidad del líquido.
- Las uniones en T de entrada y salida se extenderán hacia arriba dejando 0,02 m de espacio libre antes de la tapa.

5. RESULTADOS

5.1. Implementación de los Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial Vertical

Para implementar los humedales artificiales de flujo subsuperficial vertical pilotos, fue necesario primero describir la infraestructura donde se producen los cerdos, así como las operaciones de limpieza de la porqueriza. Primero, se determina cómo se genera el caudal y características del agua residual. A continuación, se explican las condiciones iniciales de la Finca Linda Vista y, posteriormente, el establecimiento de las unidades piloto.

5.1.1. Condiciones iniciales de la Finca Linda Vista

La Finca Linda Vista cuenta con espacios para producción de ganado porcino y vacuno, por lo que dentro de la estructura existen espacios para la producción de cerdos (porquerizas), lechería para ordeño, quesera y área de cría de terneras. Para propósitos de este proyecto se trabajó únicamente con el área de producción de ganado porcino. Realizando una evaluación de la infraestructura de las porquerizas se determinó que el espacio mide 22,49 m de largo por 7,31 m de ancho.

Dentro de ese espacio se encuentran 7 corrales para engorde, 10 jaulas para cerdas en reproducción, 6 corrales para maternidad y un patio para secado de sólidos. Las medidas de cada espacio se pueden observar en el Anexo A. Las instalaciones cuentan con tres caños por los que drena el agua de lavado en los puntos destacados en el Anexo B con color naranja. En el resto de las áreas se drena mediante desnivel hacia una salida conectada a tubería sanitaria de PVC de 3 pulgadas. Al momento de realizar la inspección se evidenció que los pisos se encontraban en mal estado y las aguas de la lechería se mezclaban con las de la porqueriza, por lo que se recomendó separarlas mediante tubería sanitaria de PVC de 3 pulgadas de diámetro, quedando la salida de los purines de cerdos intubada por aparte. Se

logra evidenciar también que no se le da tratamiento a los purines que drenan por los sitios indicados anteriormente.

Con base en la inspección inicial de la finca, se reconoce que los pisos y caños se encontraban en mal estado, con grietas que permitían el encharcamiento y la infiltración de las aguas residuales (ver Figura 16), el agua residual proveniente de la porqueriza se mezclaba con el agua residual proveniente de la lechería, la limpieza diaria del piso se realizaba mediante un lavado húmedo donde se hace un barrido de los sólidos hacia el sistema de drenaje mediante arrastre con agua a presión, como se puede observar en la Figura 17. El consumo de agua generado por este tipo de limpieza es de 1,66 m³/d. Además, los purines, tanto la fase líquida como la fase sólida, eran destinados al riego del pasto en los potreros de la finca, sin previo tratamiento.



Figura 16. Grietas en pisos y caños de la porqueriza.



Figura 17. Barrido en húmedo de los sólidos en la porqueriza.

Por esta razón, y con el fin de mejorar las prácticas de manejo de residuos sólidos y líquidos, se trabajó una “Guía Para Producción Más Limpia En El Manejo De Residuos En La Finca Linda Vista En Santa Cruz, Turrialba” (ver en Anexo D). Esta guía queda a disposición del propietario de la finca, donde se detalla cómo llevar a cabo el barrido en seco y el compostaje de los residuos sólidos, así como otras prácticas para el aprovechamiento y tratamiento de los purines del cerdo.

Por ejemplo, producto de la aplicación de la guía, se logró reducir el consumo de agua para el proceso de limpieza del piso de $1,66 \text{ m}^3/\text{d}$ a $1,15 \text{ m}^3/\text{d}$ al aplicar la técnica de barrido en seco de la manera mostrada en la Figura 18. En la Tabla 2 se pueden corroborar los caudales medidos durante la limpieza antes y después de haber aplicado la técnica de barrido en seco. Es decir que con esta actividad se reduce un 22,3% el consumo de agua. Al barrer en seco la excreta, se logra separar en promedio 43 kg de sólidos (excreta porcina) que son llevados al patio de secado donde son compostados (ver Figura 20). En la Figura 19 se observa un ejemplo de la forma en que se pesó la excreta recolectada mediante el barrido en seco. La práctica de barrido en seco permite, por un lado, tener un material fácilmente compostable, y reduce, como se explicará adelante, los sólidos y carga orgánica en el agua residual.



Figura 18. Barrido en seco y recolección de excretas.



Figura 19. Medición del peso de las excretas recolectadas con barrido en seco.



Figura 20. Compostaje de sólidos recolectados con barrido en seco.

Tabla 2. Caudales medidos durante la limpieza del piso de la porqueriza tomados con el barrido húmedo y con el barrido en seco.

Barrido húmedo de los sólidos			Barrido en seco de los sólidos.		
Caudal promedio (L/min)	Duración promedio (min/d)	Consumo diario de agua (m3/d)	Caudal promedio (L/min)	Duración promedio (min/d)	Consumo diario de agua (m3/d)
1064,59	32	1,06	1148,05	28	1,15
1513,64	37	1,51	861,03	21	0,86
2640,93	40	2,64	1025,04	25	1,03
1300,23	33	1,30	1230,05	30	1,23
2460,89	39	2,46	1353,05	33	1,35
1370,57	32	1,37	1271,05	31	1,27
1562,44	36	1,56	1148,05	28	1,15
1856,12	47	1,86	943,04	23	0,94
1199,30	30	1,20	1353,05	33	1,35
1663,19	36	1,66	1353,05	28	1,15

Al realizar la caracterización de las aguas de salida de la porqueriza, cuando aún se realizaba el lavado convencional con arrastre de sólidos, se determinó que la concentración de DQO era de 32887,5 mg DQO/L. Esta concentración es muy elevada para verter directamente en un humedal. Al aplicar el barrido en seco y, posteriormente, la limpieza del

piso con agua, se logró bajar la concentración de DQO a 5895 mg/L (ver concentraciones en Tabla 3). De igual manera, los sólidos sedimentables (SSed) se lograron reducir de 340 mL/L a 140 mL/L al aplicar el barrido en seco de la excreta (ver Figura 21). Es decir que con el barrido en seco se logra una reducción de 82,08% de la concentración de DQO y 58,82% de SSed.

Tabla 3. Comparativa de concentraciones de DQO medidas después del barrido húmedo, barrido en seco y separación de sólidos.

Parámetro	Barrido húmedo	Barrido en seco	Separación de sólidos posterior al barrido en seco
Concentración de DQO (mg/L)	33900	5820	1400
	31875	5970	1470
Promedio (mg DQO/L)	32887.5	5895	1435



Figura 21. Comparación de resultados de SSed y DQO con barrido en húmedo (izquierda) y con barrido en seco (derecha).

Aplicando la técnica de barrido en seco, las características de salida de las aguas residuales aún no son adecuadas para verter directamente en un humedal artificial. Por tanto, se decidió elaborar el sistema de tratamiento primario preliminar como se menciona en el punto 4.1.3, que consiste en una tina tipo bebedero y dos tanques IBC de 1 m³ colocados en serie. Este sistema preliminar separa grasas y espumas, además de sólidos fácilmente decantables. Como se ve en la Tabla 3, al aplicar el sistema de separación de sólidos posterior a un barrido en seco de las excretas se logró reducir la concentración de DQO a 1435 mg/L, lo que equivale a una reducción de 75,66% de la concentración de DQO respecto a la concentración resultante después de aplicar el barrido en seco previo a la limpieza de los pisos de la porqueriza con agua.

En el caso de la finca Linda Vista, se utiliza suero de leche para alimentar a los cerdos, por lo que las aguas residuales contienen de este suero, lo cual fomenta la formación de capas de grasa en los separadores de sólido (véase Figura 22), generándose natas que afectan el funcionamiento adecuado de los sedimentadores al obstruir el paso del agua. Para su eliminación se debió realizar el vaciado de los tanques IBC al menos una vez durante el período de análisis de 3 meses y la recolección de natas cada mes.



Figura 22. Capa de grasa formada en tanques separadores de sólidos.

5.1.2. Determinación del caudal de alimentación de las unidades de humedales piloto

El área superficial de los humedales piloto ($0,33 \text{ m}^2$) era un valor conocido debido a que se utilizaron cajas plásticas compradas con dimensiones conocidas. La concentración de DQO del efluente del sistema de separación de sólidos fue determinado previamente, como se indicó en la sección 5.1.1. Para la determinación del caudal de entrada con el que se alimentaría cada una de las unidades piloto de HSSFV se utilizó esa concentración de DQO, cuyo valor es de 1435 mg/L . Se determinó, mediante la ecuación 1 y utilizando un caudal de diseño de $1,15 \text{ m}^3/\text{d}$. La carga orgánica real es de $4937 \text{ g DQO/m}^2/\text{d}$.

$$B_i = \frac{(1148,05 \text{ L/d} * 1435 \text{ mg/L})}{(1000 * 0,33 \text{ m}^2)} = 4937 \text{ g DQO/m}^2/\text{d}$$

Esta carga orgánica es superior a la carga límite permitida para humedales verticales ($20 \text{ g DQO/m}^2/\text{d}$) (Salas, 2017), de manera que, para el caso de los humedales a escala piloto se decidió utilizar una carga orgánica de $20 \text{ g DQO/m}^2/\text{d}$ para establecer el caudal diario de alimentación. Conociendo el valor del área superficial, la concentración de DQO y la carga orgánica, se calculó el caudal despejándolo de la ecuación 1. Por tanto, el caudal diario de entrada a los humedales piloto es de 5 L/d . Utilizando la ecuación 2 se determinó una carga hidráulica de $13,9 \text{ mm/d}$.

$$Q = \frac{1000 * 0,33 \text{ m}^2 * 20 \text{ g DQO/m}^2/\text{d}}{1435 \text{ mg DQO/L}} = 4,7 \frac{\text{L}}{\text{d}} \cong 5 \text{ L/d}$$

$$CH = \frac{1000 * 20 \text{ g DQO/m}^2/\text{d}}{1435 \text{ g DQO/m}^3} = 13,9 \text{ mm/d}$$

5.1.3. Características de los sustratos analizados en las unidades de humedales piloto.

Para tres unidades de humedales piloto se utilizaron tapas plásticas (TP) como sustrato, las cuales variaron su tamaño. Los diámetros de las tapas reunidas varían desde 1,24 cm hasta 9 cm, en la Figura 23 se aprecia mejor los distintos tamaños de TP utilizadas. El material de las tapas generalmente es polipropileno (PP) o tereftalato de polietileno (PET), estos son materiales livianos y su densidad (900 kg/m^3) es menor a la del agua, por lo que las TP tienden a flotar en el agua. La porosidad de las TP utilizadas, determinada con el método volumétrico es de 47,5%. La porosidad de la arena empleada como primera capa filtrante en los humedales piloto es 30%, de manera que al calcular un promedio entre la porosidad de la arena y las TP, se determinó una porosidad de 38,75% para los tres humedales piloto con este tipo de sustrato.



Figura 23. Tapas plásticas de distintos tamaños utilizadas como sustrato en tres unidades de humedales piloto.

En otras tres unidades de humedales piloto se usó roca volcánica basáltica (RV) como sustrato. Los diámetros medios de las rocas empleadas en este estudio van desde 0,5 cm hasta 2,5 cm en la Figura 24 se ve una muestra de RV utilizadas como sustrato. La densidad de este tipo de sustrato es mayor a la del agua y a la de la grava, según Seguel (2019) la densidad de la RV es de 2201 kg/m^3 . La porosidad de la RV utilizada es de 55%, y la porosidad promedio de la RV y la arena es 42,5%.



Figura 24. Muestra de rocas volcánicas utilizadas como sustrato en tres unidades de humedales piloto.

Finalmente, las tres unidades de humedales restantes utilizaron piedra de río (PR) como sustrato. Los diámetros promedio de estas piedras varían entre 0,75 cm a 3,8 cm y su densidad es mayor a la del agua, pero menor a la de la RV, con valores de 1690 kg/m^3 , según Seguel (2019). La porosidad medida para las PR en este estudio es de 50% y la porosidad promedio entre las PR y la arena es 40%. En la Figura 25 se logra apreciar la PR utilizada como sustrato.



Figura 25. Muestra de piedras de río utilizadas como sustrato de tres unidades de humedales piloto.

Debido a que las cajas utilizadas cuentan con una forma de prisma trapezoidal isósceles se determinó su volumen mediante el producto del área de una de sus caras ($0,24 \text{ m}^2$) y el largo de las cajas ($0,71 \text{ m}$), para un volumen de $0,174 \text{ m}^3$. Con el volumen y la porosidad de cada sustrato, se determinó mediante la ecuación 3, el TRH teórico para cada sistema de humedales. El TRH promedio para los tres tipos de sustrato es de 15 días.

5.1.4. Funcionamiento de los sistemas de humedales piloto.

El sistema de humedales piloto inició su funcionamiento en enero del presente año. Durante el primer mes se regaban con agua potable para permitir una adaptación de las plantas al sustrato y posterior a este período se inició el riego con el agua que salía del sistema de separación de sólidos, agregando 5 L/d a cada unidad y sacando 5 L/d, los cuales no se tomaban para muestra, sino que se dejaban salir hacia la pastera cercana. En los HSSFV el caudal que entra al sistema permanece un tiempo (TRH) dentro del humedal y, pasado este tiempo, es liberado en su totalidad luego de ser tratado. Con el fin de promover la generación de una zona aerobia y una zona anaerobia dentro de los sistemas piloto, y por recomendaciones señaladas por Venegas (2020), se decidió dejar una lámina de agua dentro del sistema durante todo el período de estudio. Esta lámina se estableció en 0,44 m de altura, dejando 0,15 m libres en los humedales. Es decir que siempre se mantuvo una lámina de agua que cubrió el sustrato en estudio en su totalidad y 2 cm de la capa superior de arena.

Al mantener esta lámina de agua se propiciaron las condiciones necesarias para llevar a cabo reacciones que necesitan condiciones aerobias, como la nitrificación, en la parte superior de los humedales, mientras que en el fondo de los humedales se reunieron las condiciones necesarias para que las bacterias anaerobias realizaran transformaciones como la desnitrificación en los nutrientes presentes en las aguas residuales.

Una vez iniciado el riego con aguas residuales se notó que al sistema de abastecimiento de cada unidad llegaban algunas partículas sólidas como pelos, parásitos e insectos que no eran retenidas en el sistema de separación de sólidos. Estas partículas, unidas a las capas de grasa que contenía el agua residual, obstruían los orificios de la tubería de riego, por lo que fue necesario quitar esta tubería y lavarla cada vez que esto ocurrió. Se dio un tiempo de establecimiento de los humedales de 3 meses, por lo que se inició la toma de muestras en el mes de abril.

5.2. Evaluación de la Eficiencia de los Sistemas de Humedales Piloto Con Base en los Sustratos Evaluados.

5.2.1. Condiciones ambientales presentes en la Finca Linda Vista

Los HOBOS registraron las condiciones ambientales de la finca durante el período comprendido entre noviembre de 2021 a marzo de 2022. Dentro de la estructura donde se encontraban los humedales piloto se registraron temperaturas promedio de $16,58 \pm 3,55$ °C, con valores máximos de 30,50 °C durante el día y mínimos de 10,42 °C durante la noche. La humedad relativa promedio registrada fue de 76,64%. Fuera de la estructura las condiciones de temperatura promedio fueron de $16,86 \pm 3,93$ °C, con valores máximos de 30,63 °C durante el día y 9,52 °C durante horas de la noche y madrugada. La humedad relativa promedio fue de 80,33%. Con el pluviómetro instalado fuera de la estructura, se cuantificó una lámina de 349,3 mm de lluvia, producto de 35 eventos de precipitación en el período de febrero a julio del 2022.

En este proyecto se decidió excluir la precipitación como factor que incidiera en los humedales piloto. La precipitación, si cae en el humedal artificial, puede tener un papel de dilución de los contaminantes en el humedal. Los sistemas en este proyecto se colocaron bajo techo para asegurar que el agua que ingresó a los humedales fuera únicamente el agua residual.

5.2.2. Caracterización de las aguas residuales y eficiencias de remoción de contaminantes en los sistemas de humedales piloto.

Los propietarios de la Finca Linda Vista tienen la intención de darle un reúso al agua efluente en el sistema de tratamiento de aguas residuales que se proponga. El efluente se quiere utilizar para el riego de los pastos en los potreros de la finca. En la Tabla 4 se muestran los datos con los promedios obtenidos en el análisis de los parámetros estudiados durante las

12 semanas que abarcó la etapa de evaluación de propiedades físico-químicas del efluente y sus respectivas eficiencias de remoción de contaminantes. La Tabla 5 incluye una columna con los valores máximos de los límites permisibles para reúso tipo 5 de las aguas residuales de la actividad porcina, según lo estipulado en el Artículo 32 y la Tabla 8 del reglamento.

De acuerdo a los valores límite para los parámetros universales de análisis obligatorio establecidos en el Reglamento de Vertido y Reúso de Aguas Residuales (MINAE, 2007) para verter aguas residuales en un cuerpo receptor (Tabla 4 del reglamento) y reúso para riego de pastos de forraje (Tabla 8 del reglamento), el efluente de los sistemas pilotos no cumple con las condiciones necesarias para ser vertido ni reusado. Como se observa en la Tabla 5, los parámetros que lograron cumplir con los valores límite establecidos en el Reglamento de Vertido y Reúso de Aguas Residuales fueron SSed, PO₄-P, pH y temperatura. Las concentraciones de DQO y NT alcanzaron valores promedio que superan estos límites. Por tanto, se debe considerar establecer un tren de tratamiento primario adecuado, previo a la implementación de los humedales o recircular el agua en los humedales para reducir las concentraciones de estos contaminantes.

Tabla 4. Concentración de contaminantes y eficiencias de remoción en los sistemas de humedales a escala piloto.

Parámetros	Agua de Entrada	Tapas plásticas		Piedra de río		Roca volcánica	
	Promedio	Promedio	Remoción (%)	Promedio	Remoción (%)	Promedio	Remoción (%)
DQO (mg/L) **	6362,73 ± 4270,56 ^C	1910,3 ± 359,63 ^A	58,58 ± 22,90	2439,92 ± 610,73 ^{AB}	48,10 ± 32,60	3278,64 ± 948,97 ^B	33,12 ± 42,47
SSed (mL/L) **	4,27 ± 5,32 ^C	0,22 ± 0,28 ^A	83,66 ± 20,53	0,73 ± 0,40 ^B	72,29 ± 205,37	0,24 ± 0,17 ^A	79,01 ± 29,48
PO ₄ -P (mg/L) *	92,89 ± 19,56 ^A	14,93 ± 7,59 ^B	84,57 ± 7,57	10,02 ± 2,75 ^B	88,65 ± 3,82	14,45 ± 2,91 ^B	83,86 ± 3,63
NH ₃ -N (mg/L) *	326,00 ± 60,25 ^A	206,67 ± 53,82 ^B	34,63 ± 18,12	180 ± 16,97 ^B	43,56 ± 12,10	207,33 ± 39,51 ^B	35,86 ± 16,57
NO ₃ -N (mg/L) *	127,14 ± 72,51 ^B	47,62 ± 21,87 ^A	54,41 ± 22,00	45,24 ± 20,28 ^A	55,58 ± 20,79	39,52 ± 6,98 ^A	63,20 ± 14,04
NT (mg/L) *	600,38 ± 35,34 ^A	364,04 ± 68,31 ^B	39,37 ± 8,69	320,17 ± 23,72 ^B	46,67 ± 6,99	365,13 ± 51,68 ^B	39,18 ± 16,66
Turbidez (NTU)*	439,47 ± 177,26 ^B	90,28 ± 49,85 ^A	74,76 ± 22,23	129,04 ± 47,97 ^A	63,38 ± 36,77	106,73 ± 86,8 ^A	67,89 ± 49,99
pH	6,65 ± 0,79 ^A	7,24 ± 0,25 ^A		6,85 ± 0,14 ^A		6,87 ± 0,11 ^A	
Temperatura (°C) *	20,82 ± 2,33 ^A	19,36 ± 0,22 ^B		19,00 ± 0,29 ^B		19,11 ± 0,32 ^B	
CE (mS/cm)	5,80 ± 1,80 ^A	6,04 ± 0,14 ^A		5,63 ± 0,09 ^A		6,05 ± 0,22 ^A	

* Existen diferencias significativas ($p < 0,05$) entre el agua de entrada y los efluentes de cada tratamiento.

**Existen diferencias significativas ($p < 0,05$) entre el agua de entrada y los efluentes de cada tratamiento, y entre tratamientos (tapas plásticas, piedra de río y roca volcánica).

(^{ABC}) Letras iguales no presentan diferencias estadísticamente significativas entre sí, con base en la prueba de Tukey.

Tabla 5. Comparación de resultados con los límites máximos permitidos para aguas residuales de actividad específica de ganado porcino destinadas a verter en cuerpo de agua y reúso de tipo 5.

Parámetros	Agua de Entrada	Tapas plásticas	Piedra de río	Roca volcánica	Reúso tipo 5 de aguas de actividad porcina ⁺
DQO (mg/L)	6362,73 ± 4270,56	1910,3 ± 359,63	2439,92 ± 610,73	3278,64 ± 948,97	1000
SSed (mL/L)	4,27 ± 5,32	0,22 ± 0,28*	0,73 ± 0,40*	0,24 ± 0,17*	1
PO ₄ -P (mg/L)	92,89 ± 19,56	14,93 ± 7,59*	10,02 ± 2,75*	14,45 ± 2,91*	25
NH ₃ -N (mg/L)	326,00 ± 60,25	206,67 ± 53,82	180 ± 16,97	207,33 ± 39,51	
NO ₃ -N (mg/L)	127,14 ± 72,51	47,62 ± 21,87	45,24 ± 20,28	39,52 ± 6,98	
NT (mg/L)	600,38 ± 35,34	364,04 ± 68,31	320,17 ± 23,72	365,13 ± 51,68	50
Turbidez (NTU)	439,47 ± 177,26	90,28 ± 49,85	129,04 ± 47,97	106,73 ± 86,8	
pH	6,65 ± 0,79*	7,24 ± 0,25*	6,85 ± 0,14*	6,87 ± 0,11*	5-9
Temperatura (°C)	20,82 ± 2,33*	19,36 ± 0,22*	19,00 ± 0,29*	19,11 ± 0,32*	15-40
CE (mS/cm)	5,80 ± 1,80	6,04 ± 0,14	5,63 ± 0,09	6,05 ± 0,22	

* Valores cumplen con los límites máximos mencionados en la Tabla 5.

+ Referencia: (Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales Decreto N° 33601-MINAE-S, 2007).

A continuación, para cada parámetro, se hace una revisión del impacto que genera tratar el agua residual de la Finca Linda Vista con los humedales piloto y una comparación entre tratamientos para determinar el impacto del sustrato en estudio. Para la temperatura, se puede observar que el agua efluente de los humedales piloto se mantuvo cerca a los 19°C para todos los tratamientos, un grado centígrado menor que la temperatura del agua residual a tratar. Se considera que esta diferencia significativa es debida a que el agua de entrada provenía de los tanques sedimentadores que estaban bajo el sol, mientras que el agua dentro de los humedales se encontraba bajo el sustrato. Comparando el efecto de los distintos sustratos estudiados, no se obtuvieron diferencias significativas. Por tanto, el sustrato (TP, PR y RV) no afecta a este parámetro.

En cuanto al parámetro de pH, no hubo una diferencia significativa entre el agua residual de entrada el efluente de cada humedal piloto, así como entre tratamientos. Si se puede notar que tiende a incrementar la neutralidad del agua tratada en los humedales en comparación con el agua residual de entrada.

Para la conductividad eléctrica (CE), no hubo una diferencia significativa entre el agua residual de entrada y el efluente de cada humedal. Tampoco hubo una diferencia entre tratamientos. En los casos en que la CE de entrada era inferior a 6 mS/cm se tuvo un incremento en la CE de los tratamientos en general, siendo el sustrato de roca volcánica el que presentó un mayor incremento. Se considera que las distintas capas de sustratos en los humedales piloto aportan salinidad al agua.

En cuanto a la turbidez, si hubo una influencia significativa por parte de los humedales pilotos sobre el agua de entrada y el efluente, con porcentaje de reducción de la turbidez entre 63% y 75% respecto a la concentración de entrada de $439,47 \pm 177,26$ NTU. No hubo diferencia significativa entre tratamientos, sin embargo, los humedales pilotos con tapas plásticas reportaron mayor reducción. Los resultados de turbidez permiten tener una idea de que la cantidad de sólidos suspendidos en el agua residual tanto, de entrada, como la de salida

son elevados, por lo que se infiere que una sola unidad de humedales no tiene un gran impacto en la depuración de sólidos suspendidos para aguas residuales porcinas.

Para mejorar las condiciones de este parámetro puede ser necesario colocar una o más unidades de humedales en serie, como en el caso del estudio llevado a cabo por Gómez et al. (2010), donde se colocaron tres unidades de HSSFV en serie. En el estudio de Gómez et al. (2010), el afluente tenía una concentración de 3444 mg SST/L. La remoción de sólidos suspendidos en la primera unidad de humedales fue de 53,9%, mientras que en la segunda unidad se alcanzó una remoción de 87,5%. Esto refuerza el supuesto de que una sola unidad tiene un bajo impacto en la remoción de sólidos suspendidos y, por ende, en la turbidez del agua. En la Figura 26 se muestra el agua de entrada a los humedales piloto y los efluentes de cada humedal, y en la Figura 27 se muestra el agua de entrada y salida de los subsistemas en el estudio de Gómez et al. (2010). Con esto se puede hacer una comparación de resultados de turbidez, siendo de principal interés la salida del primer humedal en la Figura 27.

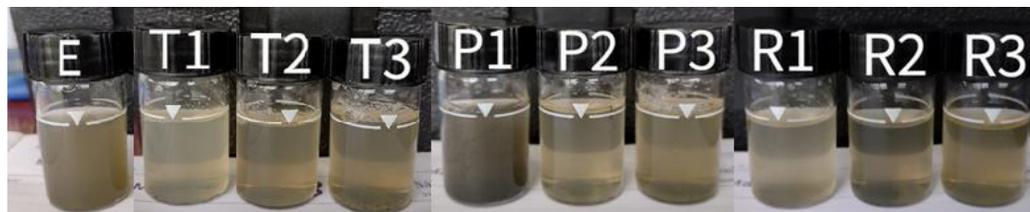


Figura 26. Comparación entre el agua de entrada (E) y los efluentes de cada tratamiento: Tapas plásticas (T), piedra de río (P) y roca volcánica (R).



Figura 27. Agua de salida de cada subsistema. De derecha a izquierda: agua de entrada, agua de salida del humedal 1, agua de salida del humedal 2 y agua de salida del humedal 3 (Gómez et al., 2010).

De esta comparación se determina que, para el caso de aguas residuales de granjas porcinas, las cuales tienen altas concentraciones de sólidos suspendidos, la turbidez es un parámetro difícil de mejorar con una sola unidad de humedales de flujo subsuperficial vertical, por lo que lo que añadir al sistema un humedal subsuperficial de flujo horizontal, cuya capacidad de remover contaminantes orgánicos es mayor, se considera beneficioso.

Se logró un máximo de 94,58% de remoción de la turbidez con la piedra de río (PR), sin embargo, los valores promedio de este parámetro en el efluente de los humedales siguen siendo elevados, lo cual es consistente con Finlayson et al. (1987), quienes analizan humedales de flujo vertical con grava roja como sustrato, sin embargo, comparado con los resultados obtenidos por Venegas (2020) donde las eficiencias de remoción de turbidez fueron casi 99%, las eficiencias de remoción en este proyecto fueron inferiores, lo cual se puede deber a la naturaleza del agua tratada.

Para sólidos sedimentables si hubo una diferencia significativa entre el agua de entrada y los efluentes de los humedales piloto. La concentración inicial de SSed fue de $4,27 \pm 5,32$ mL/L, logrando mayores remociones (83,66%) con los humedales pilotos con sustrato de TP y mínimas (72,29%) con los humedales con el sustrato de PR. Se presentaron diferencias significativas entre tratamientos para este parámetro. Los medios filtrantes de TP y roca volcánica (RV) obtuvieron mejores resultados de remoción de SSed. Entre estos sustratos no hubo diferencia significativa, pero sí con la piedra de río (véase Figura 28). En todos los casos se registraron concentraciones de SSed menores a 1 mL/L que es el límite establecido en la normativa costarricense.

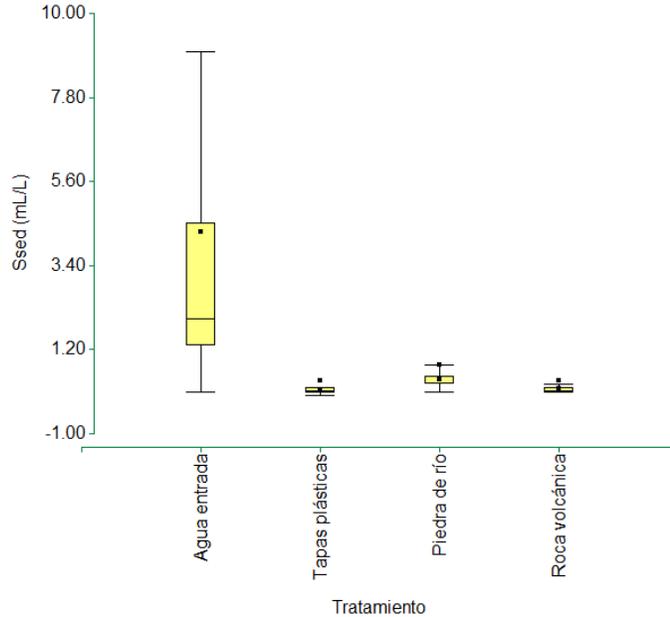


Figura 28. Gráfico de cajas para las concentraciones de sólidos sedimentables del agua de entrada y los tratamientos en estudio.

El agua de entrada presentó altas concentraciones de materia orgánica, aún después del tratamiento primario con sedimentadores, por lo que los valores de entrada de DQO fueron de hasta 16500 mg/L como máximo, lo cual afecta la eficiencia de los humedales, que fueron diseñados para cargas orgánicas menores. El agua de salida de las unidades piloto no cumple con la normativa del país, sin embargo, se considera que es debido a que se presentaron concentraciones pico de más de 10000 mg DQO/L en algunos días. Esto se puede deber a que no se realizó un barrido en seco adecuadamente cuando no hubo supervisión del proceso, lo cual incrementa las cargas contaminantes y afecta directamente la eficiencia de los humedales.

Se encontraron diferencias significativas entre el agua de entrada a los humedales y el agua residual proveniente de los humedales. También se encontró una diferencia significativa entre los tratamientos con los sustratos en estudio. La Figura 29 muestra el gráfico de cajas con las concentraciones de DQO determinadas para este proyecto. Los valores de entrada se determinaron en $6362,73 \pm 4270,56$ mg DQO/L. Los porcentajes de

depuración de DQO fueron de 58,58% en los humedales con el sustrato de TP a 33,12% en los humedales con sustrato de RV. Estas eficiencias son similares a los valores consultados en la bibliografía para tratamiento de purines de cerdo con HA.

Finlayson et al. (1987) reportó un porcentaje de remoción de DQO de 30 a 40% para concentraciones de entrada de 642 mg/L y 617 mg/L, lo cual coincide con los promedios de remoción obtenidos para los tratamientos de PR y RV, entre los cuales no se encontró diferencia significativa. Así mismo, los resultados obtenidos por Blanco (2014) indican una remoción del 35,5% para concentraciones iniciales de $380,1 \pm 181,4$ mg DQO/L y los resultados para el sustrato de RV en el estudio realizado por Venegas (2020) estuvieron entre 35 a 38% para concentraciones de entrada de $259 \pm 51,3$ mg DQO/L, las cuales son eficiencias similares al valor de remoción obtenido en este estudio para este tipo de sustrato. Por tanto, se logra un aumento significativo en la remoción de materia orgánica al utilizar TP como sustrato en los humedales piloto, alcanzando concentraciones cercanas a 1000 mg/L, por lo que, realizando mejoras en el sistema de tratamiento primario, aumentando el TRH, o utilizando varias capas de distintos sustratos en un mismo humedal, este parámetro puede llegar a cumplir con el reglamento de vertido y reúso de aguas residuales.

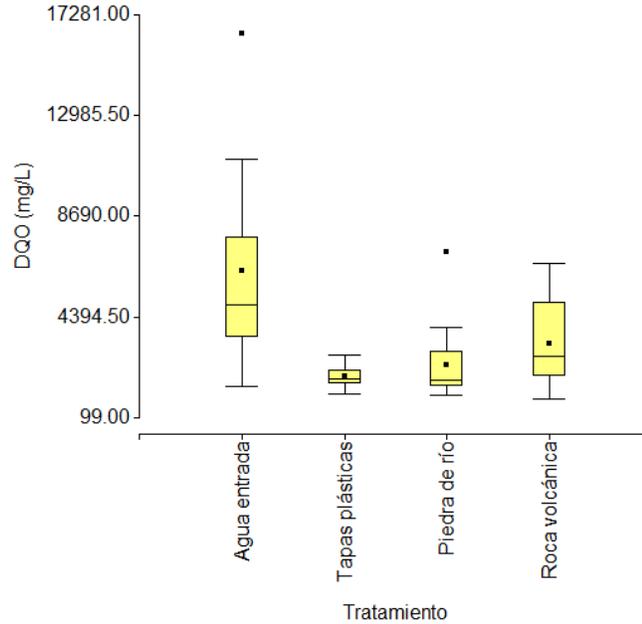


Figura 29. Gráfico de cajas para las concentraciones de sólidos sedimentables del agua de entrada y los tratamientos en estudio.

En cuanto a la eficiencia de remoción de amoníaco en los humedales piloto, hubo una diferencia significativa ($p=0,0008$) de las concentraciones de $\text{NH}_3\text{-N}$ de entrada con respecto a las de salida. El $\text{NH}_3\text{-N}$ es el componente que se encuentra en mayor concentración dentro de los purines de cerdo analizados después de la DQO, en este caso el agua de ingreso contenía en promedio $326 \pm 60,25$ mg/L de $\text{NH}_3\text{-N}$. Esta concentración es alta, pero en comparación con los datos citados en la literatura por González et al. (2015) donde los purines tratados tienen una concentración de 800 ± 100 mg/L, las cargas de amoníaco en el sistema de la finca Linda Vista son menores y, por ende, puede ser más fácil de tratar, sin embargo, los porcentajes de remoción obtenidos fueron de 43,56% a 34,63%, similares al reportado por González et al. (2015) de 38,2%.

Entre tratamientos no hubo una diferencia importante, lo que indica que el tipo de sustrato no tiene influencia sobre la conversión de NH_3 a NO_3^- por parte de las bacterias aerobias que llevan a cabo los procesos de nitrificación (Bernal, 2014).

La concentración de $\text{NO}_3\text{-N}$ inicial es de $127,14 \pm 72,51$ mg/L, superior a la reportada por González et al. (2015) de $104,8 \pm 14,5$ con una eficiencia de remoción de 8,5%, mientras que los porcentajes de remoción obtenidos con los tres tratamientos en estudio son mucho mayores (ver Tabla 4).

Para este parámetro no se encontró una diferencia significativa entre tratamientos, pero si con el agua de entrada. Esto indica que, si se está llevando a cabo adecuadamente el proceso de desnitrificación, es decir que se lograron generar áreas con bajos niveles de oxígeno disuelto dentro de los humedales al dejar una lámina de agua dentro de los sistemas, por lo que se favorece el crecimiento de bacterias heterótrofas facultativas y anaerobias, que son las encargadas de convertir el NO_3^- en N_2 (Bernal, 2014). Esta es una diferencia importante encontrada respecto a los resultados obtenidos por Venegas (2020), donde no se obtuvo remoción de $\text{NO}_3\text{-N}$.

Esta comparación permite suponer que la profundidad de los humedales juega, en este caso, un papel importante en el proceso de desnitrificación, ya que la lámina de agua de Venegas (2020) fue establecida en 0,16 m con una profundidad de humedales de 0,35 m, mientras que para este proyecto se decidió dejar una lámina de agua de 0,44 m con una profundidad de humedales de 0,59 m, de manera que, al tener una columna de agua más elevada, se logra propiciar zonas con concentraciones de OD menores a 1 mg/L, lo cual favorece las condiciones para que se lleve a cabo la desnitrificación y por lo tanto obteniendo eficiencias de remoción de $\text{NO}_3\text{-N}$ entre 63,20 % para los humedales con sustrato de RV y 54,41% para los humedales con sustrato de TP.

Para la comparación de concentraciones de NT con la normativa nacional se realizó una conversión de $\text{NH}_3\text{-N}$ y $\text{NO}_3\text{-N}$ a N_2 utilizando los pesos moleculares de cada compuesto y sumando los valores. Con base a los resultados obtenidos, se confirma el nitrógeno en los

purines de cerdo es el elemento en mayor concentración, lo cual coincide con lo mencionado por Gomez et al. (2010) en la literatura, y se considera que los HFVSS utilizados en este caso mantienen una depuración de NT cercana a los 30% mencionados por Hoffman et al. (2011) para esta configuración de HA, es decir que se están llevando a cabo los procesos de nitrificación y desnitrificación de forma adecuada.

No obstante, a pesar de que las eficiencias de remoción obtenidas fueron de 46,67% a 39,18%, la concentración inicial es muy elevada ($600,38 \pm 35,34$ mg/L), por lo que no se logra una reducción tal que permita que el efluente cumpla con la normativa de vertido y reúso de aguas residuales, superando el límite por hasta un 86%, por lo que se necesita un tratamiento previo para lograr su depuración hasta niveles permitidos o se puede valorar la recirculación del efluente para que sea tratado dentro de los humedales una vez más antes de ser pasado a otro sistema o usado para riego de pasturas.

En el caso del fósforo, se obtuvieron concentraciones de PO_4^{3-} en las pruebas realizadas. Como se observa en la Tabla 5, se convirtieron las concentraciones resultantes en términos de $\text{PO}_4\text{-P}$ al multiplicar por un factor de 0,3261, correspondiente a la relación entre los pesos moleculares de los componentes de la fórmula química, con el fin de poder realizar una comparación de las concentraciones obtenidos con los valores límites de la normativa costarricense.

Hubo diferencias estadísticamente significativas entre el agua de entrada y los efluentes de los humedales piloto. Las concentraciones iniciales de $\text{PO}_4\text{-P}$ son altas ($92,89 \pm 19,56$ mg/L) en comparación con los $67,4 \pm 18,8$ mg/L del agua de entrada utilizada por González et al. (2015) para purines de cerdo, sin embargo, los porcentajes de remoción fueron superiores, ya que en su caso obtuvieron una eficiencia de 14%, mientras que con los tres tratamientos se logró remover desde un 88,65% en los humedales con sustrato de PR hasta un 83,86% en los humedales piloto con sustrato de RV.

Entre tratamientos no se obtuvo diferencias significativas, siendo que todos los sustratos analizados permiten una buena adsorción del fósforo. Las concentraciones de $\text{PO}_4\text{-}$

P en el efluente mostraron un comportamiento similar durante el período medido, por lo que para determinar si existe diferencia entre las capacidades de adsorción de fósforo de los sustratos se debería extender el período de estudio, ya que la capacidad de cada material va disminuyendo en el tiempo. Las plantas también tienen la capacidad de remover hasta un 10% del fósforo en un HA (Hoffman et al., 2011), pero, como se verá más adelante, el desarrollo de las plantas en este estudio se complicó por diversas razones, de manera que, la remoción de PO₄-P obtenida no contempla el efecto de las plantas, lo cual justifica que los porcentajes de remoción sean aproximadamente un 10% menores a los obtenidos por (Venegas, 2020), donde sí se logró un desarrollo importante de la vegetación y se obtuvieron eficiencias de remoción cercanas a 98% de PO₄-P, para concentraciones iniciales de $5,69 \pm 3,14$ mg/L.

Con base en los resultados específicos de concentraciones de DQO y SSed, parámetros entre los cuales hubo diferencias significativas en los resultados de remoción entre tratamientos, se selecciona el sustrato de TP para el diseño de los humedales a escala real en la Finca Linda Vista.

*5.2.3. Adaptación y crecimiento de *Tithonia diversifolia* en humedales artificiales para tratamiento de purines de cerdo.*

Tithonia diversifolia, comúnmente conocida como Botón de Oro, es una planta forrajera altamente distribuida en Costa Rica y el trópico en general, ya que es originada en América Central y presenta una gran adaptabilidad a distintas condiciones ambientales y de suelo (Arronis, 2014). Esta planta tiene la capacidad de crecer en alturas desde los 0 hasta 2500 msnm, resiste amplios rangos de temperatura y precipitación, y soporta suelos ácidos y poco fértiles (Gallego et al., 2015). Es por este motivo que se decidió utilizar estacas de Botón de Oro como vegetación para los humedales piloto en este proyecto, ya que, además, es posible alimentar al ganado tanto bovino como porcino con esta planta, permitiendo mejorar

la producción y calidad de la leche en los sistemas de ganadería lechera, tal como es el caso de la finca Linda Vista.

No se encontraron investigaciones relacionadas al uso de Botón de Oro en HA, sin embargo, se notó que la presencia de esta planta en la zona de Santa Cruz de Turrialba era abundante, por lo que se eligió por su fácil disponibilidad y en busca de un provecho para la finca, que le permita generar una economía circular al utilizar los purines de cerdo para alimentar sistemas de humedales construidos y plantados con una especie que se pueda aprovechar para suplemento alimenticio en vacas y cerdos, reduciendo así las cantidades de alimentos concentrados necesarios en sus dietas.

El Botón de Oro se suele reproducir por estacas mayoritariamente, colocadas en una densidad de siembra de 1 m por 1 m (Arronis, 2014), por lo que se decidió sembrar solo dos estacas por humedal, espaciadas 0,39 m entre sí debido a las dimensiones de las cajas utilizadas. Una desventaja de este tipo de reproducción es que las estacas deben ser sembradas rápidamente después de cortadas porque tienden a deshidratarse fácilmente, y no deben ser estacas muy delgadas o verdes, ni tampoco muy leñosas porque aumenta su mortalidad (Zapata & Vargas, 2014). Este fue un problema encontrado durante su implantación en los humedales piloto y su período de adaptación, ya que se colocaron inicialmente de manera horizontal, hundiendo un poco cada estaca sobre la capa de arena y cubriendo los extremos, ya que no se deben plantar a mucha profundidad para permitir el rebrote, no obstante, la mayoría se secó y se debieron plantar nuevas estacas.

El tiempo de riego con agua potable fue de un mes únicamente, por lo que una vez plantadas las estacas e iniciado el rebrote, no hubo mucho tiempo de que se desarrollaran mucho los tallos, los cuales, fueron eliminados en su mayoría para iniciar desde cero al comienzo del riego con purines provenientes del sistema de separación de sólidos. Se obtuvieron rebrotes satisfactoriamente aun regando con las aguas residuales, pero debido a condiciones de manejo del riego inadecuadas, se generó el encharcamiento de las unidades y se pudrieron las estacas, por lo que se debió iniciar desde cero con la búsqueda y siembra de

estacas de Botón de Oro, pero esta vez se decidió plantarlas con una inclinación de aproximadamente 45% respecto al suelo, lo cual se recomienda en suelos con mal drenaje.

De esta manera se logró una disminución en la cantidad de estacas que se deshidrataron y aquellas secas se cambiaron por unas nuevas. Es importante mencionar que a esta segunda ronda de estacas sembradas no se le dio un tiempo de adaptación al medio antes de iniciar el riego con aguas residuales, pero aun así se obtuvo un rebrote rápido de la mayoría.

Antes de comenzar a medir la altura de los tallos que brotaron, se dejaron desarrollar por una semana para determinar cuántas plantas sobrevivirían, ya que en algunos casos se tendieron a secar después de nacidos los nuevos brotes, por lo que se optó por no volver a sembrarlas y medir solamente aquellas que pudieron crecer. En las plantas que lograron su desarrollo, se observó un crecimiento exponencial (ver Figura 30), ya que al inicio se dio una producción de hojas principalmente, mientras que al finalizar la etapa de mediciones se había comenzado un crecimiento de los tallos, lo cual coincide con el comportamiento de las plantas reportado por Gallego et al. (2015) después de haber realizado un corte de uniformidad.

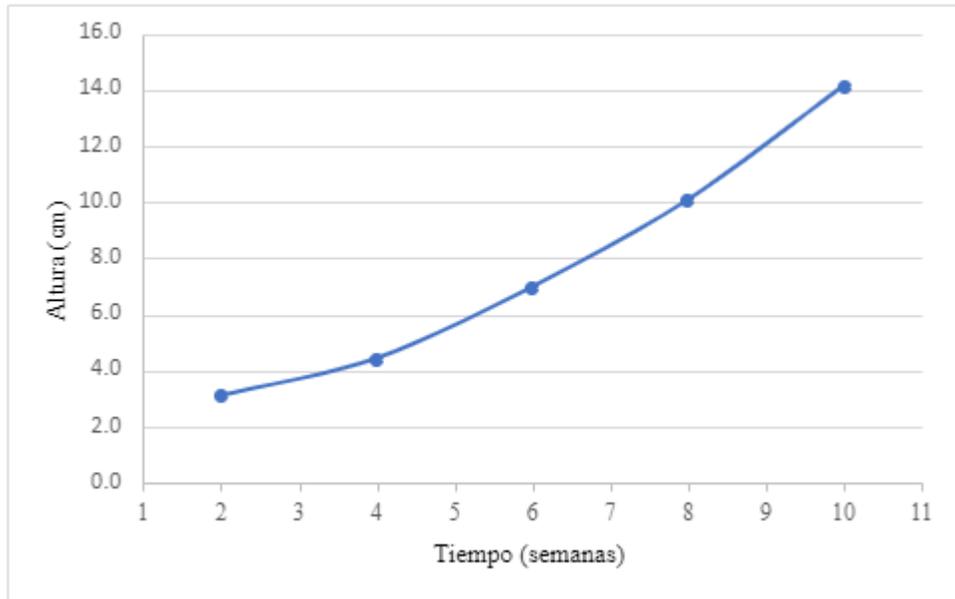


Figura 30. Curva de crecimiento promedio de Botón de Oro en humedales piloto.

Arronis, (2014) menciona que *T. diversifolia* es capaz de captar nitrógeno del ambiente y fijarlo en sus hojas al igual que las leguminosas, por lo que se considera que en las plantas utilizadas en este proyecto se sobrepasó en algunos casos su capacidad y se generó una toxicidad por las altas cargas de nitrógeno presentes en el agua, ya que las hojas se tornaron amarillas, recuperándose en algunos casos, como se ve en la Figura 31, y llegando a morir la planta en otros, como en el caso mostrado en la Figura 32.



Figura 31. Crecimiento de planta con amarillamiento de hojas y recuperación.



Figura 32. Crecimiento de planta con amarillamiento y muerte.

El Botón de Oro también tiene la capacidad de almacenar altos contenidos de fósforo, pero debido a que la captación de fósforo por plantas equivale a un porcentaje muy pequeño de la remoción de este contaminante en HA, no se consideró la influencia de estas plantas en las concentraciones del efluente. Tampoco se consideró su efecto sobre el resto de los contaminantes debido a que fueron pocas las plantas que lograron desarrollarse y la producción de raíces capaces de entrar en contacto con el agua dentro de los humedales no se logró durante el período de estudio.

Muchas plantas murieron debido a un efecto quemante por cargas de contaminantes muy elevadas en el agua de entrada al caer directamente sobre las hojas al momento del riego, por lo que se notó que las plantas que más se desarrollaron nacieron en las partes de las estacas más elevadas del suelo o en áreas donde no había caída directa del agua residual.

5.3. Dimensionamiento de Sistema de Tratamiento Real Para la Finca Linda Vista

A continuación, se detalla el tren de tratamiento para la Finca Linda Vista. Este sistema se propone que tenga los siguientes componentes: trampa grasa, tanque séptico y humedales artificiales. La Figura 33 muestra un diagrama general del proceso.

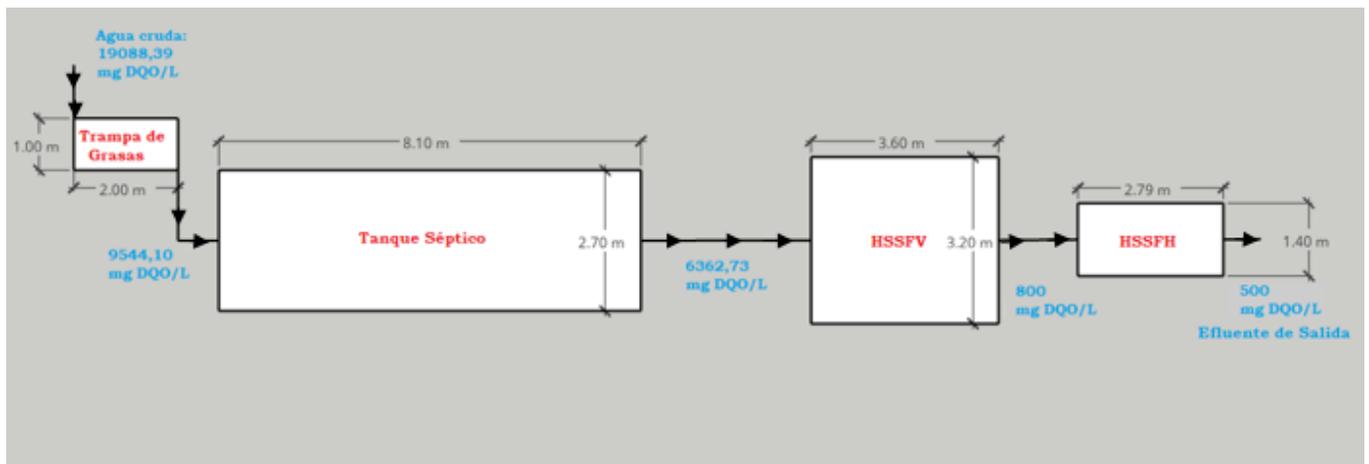


Figura 33. Diagrama del tren de tratamiento de aguas residuales propuesto para la Finca Linda Vista.

5.3.1. Trampa de grasas.

Una trampa de grasa es un dispositivo o contenedor utilizado para realizar la separación de la grasa y aceites en las aguas residuales que por su origen presenten grasa en cantidad tal que pueda afectar el buen funcionamiento de los sistemas de tratamiento de aguas. Su finalidad es interceptar el agua residual cruda y, mediante un flujo lento en su interior, permitir la separación de la fase grasosa y permitir solamente el paso del agua hacia los siguientes sistemas de tratamiento de aguas residuales.

De acuerdo al Artículo 7.8.1-2. del Código de Instalaciones Hidráulicas y Sanitarias en Edificaciones (CFIA, 2017), el tiempo de retención en una trampa de grasa no debe ser

menor a 24 minutos, para el caso de las condiciones de operación de la Finca Linda Vista, se estableció un TRH de 24 horas. La profundidad será al menos de 0,80 m y se deberá dejar un espacio libre entre el nivel del agua y la tapa de 0,20 m, por lo que la profundidad del líquido será de 0,60 m.

El caudal promedio que ingresa a la trampa de grasa es de 1,15 m³/d. Se ajustaron las dimensiones de manera que se tenga una capacidad adecuada para almacenar ese volumen diario. Según el Artículo 7.8.1-2.h del código, la relación entre el largo y ancho debe ser de 2:1. Para cumplir con esa condición se estableció un largo de 2 m y un ancho de 1 m, lo cual permite almacenar 1,2 m³ de líquido.

$$V_L = 2 \text{ m} * 1 \text{ m} * 0,6 \text{ m} = 1,2 \text{ m}^3$$

Para el volumen total de la trampa de grasa se debe contemplar la profundidad de 0,8 m. El volumen total de la trampa de grasa es de 1,6 m³.

$$V_{Total} = 2 \text{ m} * 1 \text{ m} * 0,8 \text{ m} = 1,6 \text{ m}^3$$

De acuerdo al Artículo 7.8.1-3 del código, las trampas de grasa deben contar en la salida con una cámara para toma de muestras del efluente para realizar análisis. En este caso, esta cámara tendrá una profundidad de 0,35 m, un largo de 0,2 m y un ancho de 0,2 m.

En la entrada de la trampa de grasa se deberá colocar una unión en T conectada a un niple de 0,15 m de largo y en la salida se colocará una unión en T conectada a un niple de 0,3 m de largo. El diámetro de la tubería utilizada será de 0,075 m (3 pulgadas). Se deberá contar con una tubería de ventilación en la tapa de la trampa de grasa de 0,05 m de altura y un diámetro de 0,038 m (1 ½ pulgadas). Con base en el diseño anterior se espera una

remoción de 20% del DQO, por lo que el agua cruda, con 19088,39 mg DQO/L, al pasar por la trampa de grasa, saldría en 9544,10 mg DQO/L (Figura 33).

5.3.2. *Tanque séptico.*

El tanque séptico es un sistema anaerobio utilizado para el tratamiento individual de residuos y puede mejorar su funcionamiento al complementarse con otras unidades. El objetivo de este sistema es funcionar como un tanque sedimentador/biodigestor que cumpla apropiadamente con la retención de los sólidos más pesados y de las grasas restantes que viajan con los líquidos.

Según el Código de Instalaciones Hidráulicas y Sanitarias en Edificaciones (CFIA, 2017), los tanques sépticos pueden ser colocados en serie con otras unidades individuales para complementar el proceso para el tratamiento de aguas residuales, entre las que se menciona las biojardineras (humedades artificiales). El retiro de los tanques sépticos será de al menos 1,0 m de los linderos de la vivienda, o en este caso de la finca, mientras que el retiro de los humedales artificiales deberá ser de 20 m, según el Reglamento de Aprobación y Operación de Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales (MINAE, 2016). En caso de estar conectados ambos sistemas se toma el retiro mayor, en este caso 20 m, tanto para el tanque séptico como para los humedales. El funcionamiento correcto de un tanque séptico depende de que el tanque sedimentador/biodigestor cumpla con la retención de los sólidos más pesados y de las grasas que viajan con los líquidos.

De acuerdo al Artículo 10.2-20. del código, el tiempo de retención para la sedimentación en un tanque séptico no debe ser menor a 24 horas. Para el caso de las condiciones de operación del HSSFV de la Finca Linda Vista, se estableció un TRH de 3 días. La profundidad útil de líquido es de 1,0 m y se deberá dejar un espacio libre entre el nivel del agua y la tapa de 0,20 m, por lo que la profundidad real será de 1,20 m.

De acuerdo al código, se utiliza la ecuación 8 para determinar el volumen para sedimentación, sin embargo, el caudal de entrada es un valor conocido ($1,15 \text{ m}^3/\text{d}$), por lo que se determinó este volumen como el producto del caudal diario por el TRH requerido. El volumen para sedimentación es de $3,45 \text{ m}^3$.

$$V_s = Q * t_h = 1,15 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} * 3 \text{ d} = 3,45 \text{ m}^3$$

La cantidad de animales se estableció en 200, correspondiente a la capacidad máxima de la finca. El tiempo de retención para la biodigestión se determinó en 76,3 días. Con la ecuación 9 se obtuvo un volumen para biodigestión de $7,63 \text{ m}^3$.

$$t_d = 28(1,035)^{35-17} = 76,3 \text{ d}$$

$$V_d = 0,5 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{animal}/\text{d} * 200 \text{ animales} * 76,3 \text{ d} = 7,63 \text{ m}^3$$

El factor r tiene un valor de 30 L/persona/año y el período de limpieza se estableció en 2 años. Mediante la ecuación 10 se determinó un volumen de almacenamiento de lodos digerido de $10,75 \text{ m}^3$.

$$V_a = 10^{-3} * 30 \text{ L}/\text{animal}/\text{año} * 200 \text{ animales} \left(2 \text{ años} - \left(\frac{76,3 \text{ d}}{365 \frac{\text{d}}{\text{año}}} \right) \right) = 10,75 \text{ m}^3$$

El volumen total de líquido, calculado con la ecuación 11, se determinó en 21,83 m³.

$$V_L = 3,45 \text{ m}^3 + 7,63 \text{ m}^3 + 10,75 \text{ m}^3 = 21,83 \text{ m}^3$$

Con una relación de 3:1 entre las dimensiones del tanque, se estableció un largo de 8,1 m y un ancho de 2,70. Con base en estas dimensiones y la profundidad real, se determinó un volumen real de 26,24 m³. Para la tubería de entrada y salida se utilizará tubería sanitaria de PVC de 0,075 m de diámetro con uniones en T conectadas a niples de 0,18 m hacia arriba. La unión en T de la entrada se conectará a un niple de 0,33 m de longitud hacia abajo y la unión en T de la salida se conectará a un niple de 0,4 m de longitud hacia abajo.

Con base en el Código de Instalaciones Hidráulicas y Sanitarias en Edificaciones (CFIA, 2017), el espacio libre entre la salida de aguas y la parte superior del acumulado de los lodos no debe ser menor a veinte centímetros (0,20 m). La cercanía de las natas o espacio libre entre el fondo de ellas y la salida de aguas no debe ser menor a cinco centímetros (0,05 m). El lodo estabilizado generado en un tanque séptico es valioso como fuente de nutrientes y como acondicionador del suelo, por lo que podría emplearse en agricultura, siempre que se provea la debida protección para la salud de las personas. Con base en el diseño propuesto el efluente del tanque séptico sería de 6362,73 mg DQO/L, considerando una eficiencia de remoción de 50% (Figura 33).

5.3.3. Humedal subsuperficial de flujo vertical.

Los humedales artificiales son considerados sistemas de ingeniería diseñados para reproducir las funciones naturales de los humedales en la naturaleza. Su objetivo es tratar los contaminantes presentes en aguas residuales mediante reacciones biológicas y procesos

naturales. Esto los convierte en sistemas ecológicos de bajo costo de implementación y mantenimiento.

El caudal de aguas residuales producido diariamente en la finca Linda Vista es de 1,15 m³/d, por lo que utilizó este valor como caudal de diseño para el humedal. El diseño se realizó utilizando la concentración de DQO como base, de manera que se tiene una concentración inicial promedio de 6362,73 mg/L, mientras que, como el límite máximo para este parámetro en la normativa del país es de 1000 mg/L, se decidió diseñar para obtener una concentración final de 800 mg/L de DQO. Se diseñó el humedal con el modelo de flujo de tapón modificado $k-C^*$. Con la ecuación 6 se determinó el valor de la constante C^* en 340,72 mg DQO/L, como se observa a continuación.

$$C^* = 3,5 + 0,053 * 6362,73 \text{ mg DQO/L} = 340,72 \text{ mgDQO/L}$$

La profundidad recomendada en UN-HABITAT (2008) para HA de flujo vertical es de 0,70 m, por lo que se utilizó ese valor para el diseño. La temperatura promedio de la zona fue de 16,86 ±3,93 °C, de manera que se calculó un valor K utilizando la ecuación 7 con una temperatura de referencia de 17 °C, con lo cual se obtuvo una K de 0,26 m/d. La porosidad del sustrato se tomó como 40,4% debido a que es el promedio entre los sustratos estudiados, ya que no se encontraron diferencias significativas entre tratamientos para la mayoría de los parámetros.

$$K_T = 1,1 \text{ d}^{-1} * (1,06)^{(17-20)} = 0,92 \text{ d}^{-1}$$

$$K = 0,92 \text{ d}^{-1} * 0,7 \text{ m} * 0,404 = 0,26 \text{ m/d}$$

Utilizando la ecuación 5 se obtuvo un área superficial de 11,38 m², al buscar una combinación de dimensiones que permitan obtener ese valor de área se definió que el

humedal deberá tener 3,6 m de largo y 3,2 m de ancho. Esto da un área de 11,52 m², lo cual cumple con el área requerida y permite tener espacio para evitar rebalses en caso de altas tasas de precipitación, lo cual es común en la zona.

$$A_s = \frac{1,15 \frac{m^3}{d}}{0,26 \frac{m}{d}} * \ln \left(\frac{6362,73 \frac{mg DQO}{L} - 340,72 \frac{mg DQO}{L}}{800 \frac{mg DQO}{L} - 340,72 \frac{mg DQO}{L}} \right) = 11,52 m^2$$

Así, la profundidad del humedal es de 0,7 m, por lo que el volumen que se podrá almacenar será de 8,06 m³, y utilizando la ecuación 3 se estableció que el TRH será de 3 días.

$$TRH = \frac{(0,404 * 8,06 m^3)}{1,15 m^3/d} = 2,80 d \cong 3 d$$

De acuerdo con los resultados de la caracterización de aguas residuales y la eficiencia remoción de contaminantes, se recomienda el uso de TP como sustrato base para el humedal de la finca, sin embargo, en caso de que se dificulte la recolección de este material, se recomienda en segundo lugar utilizar PR como sustrato para tratar los purines de la Finca Linda Vista.

5.3.4. Humedal artificial subsuperficial de flujo horizontal.

Como medida para mejorar el rendimiento del sistema en el tratamiento de aguas residuales porcinas, se propone el uso de un sistema híbrido de utilice dos humedales: uno de flujo vertical y uno de flujo horizontal, colocados en serie. Por esta razón se optó por diseñar un HSSFH que se colocaría posterior al HSSFV diseñado en el punto 5.3.3.

Para el HSSFH se usó una concentración inicial de 800 mg/L y una concentración final de DQO de 500 mg/L. La C* calculada mediante la ecuación 6 para este caso es de 45,9 mg DQO/L.

$$C^* = 3,5 + 0,053 * 800 \text{ mg DQO/L} = 45,90 \text{ mgDQO/L}$$

El caudal de diseño es de 1,15 m³/d y la K se calculó con la ecuación 7 para una temperatura de 17°C y una profundidad establecida para este humedal de 0,4 m. El valor de la K_T se mantiene en 0,92 d⁻¹ y la porosidad del sustrato es de 40,4%. Así, la K calculada es de 0,15 m/d.

$$K = 0,92 \text{ d}^{-1} * 0,4 \text{ m} * 0,404 = 0,15 \text{ m/d}$$

Con base en estos datos se calculó, mediante la ecuación 5, el área superficial requerida (3,89 m²). Se estableció las dimensiones de 2,79 m de largo y 1,40 m de ancho, con una relación 2:1 entre dimensiones.

$$A_s = \frac{1,15 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}}{0,15 \frac{\text{m}}{\text{d}}} * \ln \left(\frac{800 \frac{\text{mg DQO}}{\text{L}} - 45,90 \frac{\text{mg DQO}}{\text{L}}}{500 \frac{\text{mg DQO}}{\text{L}} - 45,90 \frac{\text{mg DQO}}{\text{L}}} \right) = 3,89 \text{ m}^2$$

El volumen del humedal es de 1,56 m³ y el TRH calculado es de 1 día, pero para efectos de operación se utilizaría el TRH de 3 días calculado para el HFVSS.

Con esta alternativa es posible obtener un tratamiento adecuado de los purines de cerdo para la finca Linda Vista, mejorando la eficiencia al utilizar un sistema híbrido de humedales artificiales subsuperficiales.

Con el sistema de tratamiento presentado se espera tener el comportamiento en las aguas efluentes presentado en la Figura 33, donde el agua cruda entra a la trampa de grasa con una concentración de 19088,39 mgDQO/L. En esta unidad, se espera una eficiencia de remoción de 20%, lo que implica que el efluente de la trampa de grasa quedaría en 9544,10 mg DQO/L. Este efluente ingresa al tanque séptico, donde se espera una remoción de 50% del DQO. El efluente de esta unidad tendría una concentración de 6362,73 mg DQO/L, lo cual corresponde al agua de entrada al humedal de flujo vertical. Según el diseño propuesto, el efluente de este humedal quedaría en 800 mg DQO/L, el cual ingresa al humedal de flujo horizontal. Con base en esta concentración y las consideraciones de diseño, la concentración final del efluente que sale del HSSFH es de 500 mg DQO/L.

6. CONCLUSIONES

La Finca Linda Vista cuenta con un área de porqueriza cuya infraestructura abarca un espacio de 22,49 m de largo por 7,31 m de ancho. Los pisos se encontraban en mal estado y las aguas de la lechería se mezclaban con las de la porqueriza. Se logró evidenciar que no se le da tratamiento a los purines que drenan por las tuberías y caños de la porqueriza. La limpieza diaria del piso se realizaba mediante un lavado húmedo. El consumo de agua generado por este tipo de limpieza es de 1,66 m³/d. Los purines, eran destinados directamente al riego del pasto en los potreros de la finca; siendo una práctica no recomendable por la generación de contaminación difusa.

Se logró reducir el consumo de agua a 1,15 m³/d para el proceso de limpieza del piso, disminuyendo en 22,3% al aplicar la técnica de barrido en seco. Al barrer en seco la excreta, se logra separar en promedio 43 kg de sólidos (excreta porcina) que son llevados al patio de secado donde son compostados.

El agua residual producida en el área de producción de cerdos de la Finca Linda Vista contiene altas cargas de contaminantes; principalmente materia orgánica, se determinó una concentración inicial de 32887,5 mg DQO/L. Lo cual implica una enorme contaminación ambiental si esas aguas son liberadas a los suelos. Además, dicha concentración es muy elevada para ser vertida directamente en un humedal.

El barrido en seco de las excretas previo al lavado de las porquerizas es un método de bajo costo que permite reducir la cantidad de sólidos en el agua residual y su aprovechamiento posterior. Además, permite reducir hasta un 82,08% de la carga orgánica presente en las aguas residuales. Los sólidos sedimentables (SSed) se lograron reducir de 340 mL/L a 140 mL/L al aplicar la técnica de barrido en seco, lo que equivale a una reducción del 58,82%.

Previo al uso de HA se requiere de un tratamiento primario como mínimo para separar las grasas y espumas, así mismo las partículas de mayor tamaño que puedan obstruir los

humedales. El sistema separador de sólidos utilizado se diseñó con esta finalidad y logró reducir hasta un 75,66% la carga orgánica lograda con el barrido en seco, llegando a valores de 1435 mg DQO/L.

La porosidad de los materiales en estudio (TP, RV y PR) es muy similar, siendo en promedio de 40,4%. Las condiciones de operación del sistema de humedales piloto se adecuaron a las medidas de las cajas plásticas utilizadas como unidades: un área superficial de 0,33 m², la profundidad de 0,59 m con una lámina de agua de 0,44 m, la carga orgánica de diseño fue 20 g DQO/m²/d, un caudal de diseño de 5 L/d, una carga hidráulica de 13,9 mm/d y el TRH se estableció en 15 días. La temperatura ambiental de la zona en promedio fue de 16,86 °C, mientras que en la estructura donde se encontraban los humedales la temperatura promedio fue de 16,58 °C.

En cuanto a la caracterización de parámetros en las aguas residuales para determinar la eficiencia en la remoción de contaminantes, se determinó que mayoritariamente no hubo diferencias significativas entre tratamientos; con los parámetros de DQO y SSed como únicas excepciones. Por otro lado, si se presentaron diferencias significativas entre la caracterización del agua de entrada y las del efluente de los humedales, a excepción del pH y la CE.

Con respecto a la concentración inicial de $6362,73 \pm 4270,56$ mg DQO/L, los tratamientos de tapas plásticas y piedra de río permitieron obtener mayores eficiencias de remoción, 58,6% y 48,1% respectivamente, en comparación con el tratamiento de roca volcánica (33,2%).

Las mayores eficiencias de remoción de SSed fueron obtenidas con los sustratos de TP y RV. Para concentraciones de entrada de $4,27 \pm 5,32$ mL/L, con el sustrato de TP se removió un 83,7% de SSed, mientras que con el sustrato de RV se removió un 79,0% de SSed.

El comportamiento anterior se replicó para la variable turbidez, obteniéndose valores de $439,47 \pm 177,26$ NTU en el agua de entrada. Con el sustrato de TP se removió un 74,8% de turbidez, y con el sustrato de RV se removió un 67,9% de turbidez.

El $\text{NH}_3\text{-N}$ se encontró en mayores concentraciones que el $\text{NO}_3\text{-N}$, sin embargo, los humedales contaron con las condiciones necesarias para que se lograra tanto la nitrificación como la desnitrificación al dejar una lámina de agua permanente dentro de los humedales. En el caso de NT se registraron concentraciones iniciales de $600,38 \pm 35,34$ mg/L y se alcanzó una remoción de hasta 46,7% con PR. Se presume que hubo toxicidad para las plantas por las altas concentraciones de nitrógeno.

A pesar de que no se logra cumplir con los valores límites según el Reglamento de vertido y reúso de aguas residuales correspondientes a las concentraciones de DQO y nitrógeno total, si se logró obtener una remoción de más del 90% para estos parámetros en comparación a las concentraciones del agua cruda, por lo cual se propone un tren de tratamiento para un sistema a escala real, de manera que se logre alcanzar concentraciones que cumplan con la normativa del país.

La plantación de *Tithonia diversifolia* en los humedales artificiales es factible por su capacidad de adaptación rápida a condiciones adversas. Lo cual, quedó demostrado al sembrar la segunda sepa sin previa adaptación y siendo capaz de crecer bien, mientras se planten las estacas con un ángulo de inclinación y sin caída directa del agua residual sobre las hojas.

Para el manejo de las aguas residuales se diseñó un tren de tratamiento compuesto por una trampa de grasas, tanque séptico y dos humedales artificiales en serie (HSSFV y HSSFH).

- La trampa de grasas cuenta con dimensiones de 0,8 m de profundidad, 1 m de ancho y 2 m de largo. El TRH será de 24 horas y la eficiencia de diseño es de 20% de remoción de materia orgánica. El tanque séptico se diseñó para 8,10 m de largo, 2,70

m de ancho y una profundidad de 1,2 m. El TRH para el tanque séptico es de 3 días con una eficiencia de 50% de remoción de materia orgánica.

- Para el diseño del humedal vertical a escala real, el caudal de diseño se tomó como 1,15 m³/d. La profundidad se estableció en 0,7 m y se determinó que debe tener 3,6 m de largo por 3,2 m de ancho. El TRH del sistema es de 3 días. La concentración del efluente se estableció en 800 mg DQO/L.
- Es posible mejorar la eficiencia de remoción de contaminantes del sistema general mediante una composición híbrida de HA de flujo vertical y horizontal, utilizando HSSFH de 0,4 m de profundidad, 2,79 m de largo y 1,40 m de ancho conectado en serie con el humedal vertical. La concentración del efluente en este humedal se estableció en 500 mg DQO/L. Con esto se espera lograr que los parámetros medidos alcancen niveles que permitan cumplir con los límites establecidos en la normativa costarricense y la finca pueda aprovechar el efluente para riego de los pastos sin problema.

El TRH para el sistema de humedales piloto se calculó en 15 días para las concentraciones de DQO de diseño (1435 mg/L), sin embargo, para una concentración de DQO mucho mayor (6362,73 mg/L), fue posible reducir el TRH a 3 días para los humedales a escala real, resultando en un TRH de todo el sistema de tratamiento de 10 días con el tren de tratamiento propuesto.

Se brindó capacitación al operario de la finca encargado de las porquerizas para realizar las mediciones de caudal y pesaje de sólidos, así como los métodos para realizar el barrido en seco y compostaje. Así mismo en la Guía para producción más limpia en la finca Linda Vista (Anexo D) se describen estos procesos y queda a disposición del propietario, por lo que la puesta en marcha del tren de tratamiento y las pruebas necesarias para su funcionamiento será responsabilidad del productor.

7. RECOMENDACIONES

Para simplificar la remoción de grasa durante el mantenimiento de la trampa de grasas, es recomendable que se instale en el fondo de la trampa una bandeja perforada de hierro inoxidable que cuente con agarraderas.

Si se desea replicar el sistema de humedales piloto para aguas provenientes de purines de cerdo, es recomendable utilizar una tubería de riego de mayor diámetro, puede ser de 3/4 de pulgada, y hacer orificios más grandes para evitar la obstrucción por sólidos como parásitos o pelos que pueden ir en el agua residual.

En caso de optar por el uso de tapas plásticas como sustrato, se recomienda uniformizar el tamaño de las tapas para mejorar la filtración de sólidos y lograr reducir la cantidad SST en el efluente.

Es posible utilizar una mezcla de sustratos para mejorar las eficiencias del sistema, por lo que se recomienda el uso de una capa de tapas plásticas, una capa de piedras de río y una capa de arena. También es recomendable analizar el efecto de utilizar arena gruesa en vez de arena fina para mejorar la infiltración del agua de entrada y que no se generen mohos en la superficie de los humedales.

También se puede analizar el uso de plantas ornamentales que han probado ser eficientes en HA con un rápido desarrollo de raíces o buscar plantas que representen una oportunidad de aprovechamiento en el sistema de producción de la finca y que tengan una buena resistencia a altas concentraciones de nitrógeno en el suelo.

Para lograr la evaluación más detallada del desarrollo de plantas de Botón de Oro en HA es importante considerar extender la etapa experimental por un período de tiempo que comprenda más de 3 meses, lo cual también favorecería la maduración del sistema de humedales, aumentando la posibilidad de mejorar las eficiencias y encontrar diferencias significativas entre tratamientos.

En el caso de este proyecto, debido a que el período de funcionamiento de los humedales pilotos se vio reducido como consecuencia de la pandemia por COVID-19, no se da un tiempo apropiado para el desarrollo de una biopelícula dentro de los sustratos en los humedales. Esto puede afectar el rendimiento de los sistemas en cuanto al tratamiento de aguas residuales, por lo que se considera recomendable para investigaciones futuras agregar un inóculo de microorganismos al sustrato de los humedales para favorecer la generación de la biopelícula.

Es importante que para la correcta aplicación y mantenimiento del tren de tratamiento a escala real se lleven a cabo por parte del productor una serie de evaluaciones sencillas como caudal, pH, temperatura y sólidos sedimentables de forma periódica, consideradas dentro de un plan de seguimiento de las condiciones de operación del sistema en cumplimiento con los análisis establecidos en la normativa costarricense (véase Anexo D), para lo cual se debe capacitar a los operadores.

Con base en el Reglamento de vertido y reúso de aguas residuales (DE- 33601-MINAE-S) la planta de tratamiento para esta finca requiere estar inscrita ante el Ministerio de Salud y cumplir con una bitácora y elaboración de un reporte operacional para evidenciar que el tratamiento se está dando adecuadamente. Es decir, es necesario que se elabore, por parte de la contratación de un especialista, un reporte operacional del sistema de tratamiento de aguas a escala real con una frecuencia de seis meses, donde se reportarán los valores de los parámetros medidos regularmente según el plan de seguimiento de las condiciones de operación del sistema, y los resultados de los análisis de parámetros físico-químicos y microbiológicos mencionados en la Tabla 1, llevados a cabo por un laboratorio debidamente autorizado por el Ministerio de Salud.

8. LIMITACIONES

El inicio del proyecto se vio retrasado por los efectos de la pandemia por COVID-19, ya que se restringieron las visitas a la finca, ya que los propietarios son adultos con factores de riesgo y se manejan productos como leche y quesos destinados a consumo humano, de manera que la inspección de las estructuras, mejoras y la instalación del sistema de tratamiento primario fuera más lento de lo esperado.

Además, se debió justificar el estudio realizado y esperar la aprobación por parte de autoridades de Senasa y el MS, lo cual también retrasó el inicio del proyecto. Se debió presentar un plan de acción ante el MS para continuar con el proceso de construcción del sistema piloto, ya que los materiales para el sistema primario fueron un aporte del propietario de la finca, el cual no incurriría en gastos hasta tener el visto bueno del proyecto por parte de las autoridades.

Las dimensiones de las unidades de humedales piloto se vieron limitadas por las dimensiones de las cajas utilizadas, con 0,59 m de profundidad, lo cual es menor a los 0,70 m recomendados en la literatura para humedales de flujo vertical, por lo que se debieron ajustar las medidas de las capas de sustrato al espacio disponible.

En cuanto a la operación de los sistemas piloto se encontraron entre otras:

- Dificultades en la logística de riego de las unidades.
- El agrietamiento de una de las cajas, la cual debió desarmarse para su reparación.
- La obstrucción de tuberías por exceso de grasas y sólidos, al no realizar adecuadamente el barrido en seco y la no remoción de natas en los separadores de sólidos.
- La logística de toma de muestras por dificultades de traslado hasta la finca.
- Las mediciones de pH se vieron limitadas por fallo del instrumento de medición.

- La disposición de solo tres conos Imhoff para medición de SSed.

En la etapa de caracterización de las aguas tanto de entrada como de salida, no se contaba con una referencia sólida en cuanto a las concentraciones iniciales de $\text{NH}_3\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$ y PO_4^{3-} por lo que se tuvo que pasar por un período de ajuste para encontrar los porcentajes de dilución de las muestras que permitieran obtener datos dentro del rango legible por el colorímetro.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andrés, E. (2010). *Evaluación De La Capacidad De Retención De Fósforo Mediante Procesos De Adsorción Empleando Zeolita, Y Su Aplicación En Sistemas De Humedales Construidos Para La Depuración De Aguas Residuales Urbanas*. Universidad de Valladolid, España.
- Araya, F. (2012). *Alternativas de tratamiento de aguas servidas para núcleos humanos de baja densidad poblacional mediante sistemas híbridos de humedales artificiales*. Universidad de Concepción, Chile.
- Arronis, V. (2014). *Banco Forrajero de Botón de Oro*. INTA. <http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/AV-1410.pdf>
- Bernal, O. (2014). *Diseño de Unidad Piloto de Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial Para Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas en el Campus UMNG-Cajicá Con Fines de Reúso*. Universidad Jorge Tadeo Lozano, Bogotá.
- Blanco, I. (2014). *Aplicación de humedales artificiales para la depuración de purines de granjas porcinas*. Universidad de León, España.
- Castañeda, L. A. (2017). *Revisión De Nuevos Criterios Para El Diseño, Operación De Humedales Artificiales Para El Tratamiento De Agua Residual Doméstica*. Universidad

Nacional de Ingeniería, Perú.

CFIA (2017). *Código de Instalaciones Hidráulicas y Sanitarias en Edificaciones*. Costa Rica.

Consejo Nacional de Producción. (2016). *Mercado de carne de cerdo*. Costa Rica.

Fernández, J., De Miguel, E., De Miguel, J., & Curt, M. D. (2014). *Manual de Fitodepuración. Filtros de macrofitas en flotación*. Universidad Politécnica de Madrid.
<https://www.aguasresiduales.info/revista/libros/manual-de-fitodepuracion-filtro-de-macrofitas-en-flotacion>

Finlayson, M., Chick, A., Von Oertzen, I., & Mitchell, D. (1987). *Treatment of Piggery Effluent by an Aquatic Plant Filter*. *Biological Wastes*, 19, 179–196.

Fuenzalida, D. (2012). *Operación de un sistema piloto de humedales construidos para la depuración de aguas servidas: Consideraciones de la actividad biológica en la eliminación de materia orgánica y nutrientes* [Universidad de Concepción, Chile].
<http://www.eula.cl/giba/wp-content/uploads/2017/09/tesis-daniel-fuenzalida-2012.pdf>

Gallego, L. A., Mahecha, L., & Angulo, J. (2015). *Crecimiento y desarrollo de Tithonia diversifolia Hemsl. A Gray en condiciones de trópico alto* (Issues 3° Congreso Nacional de Sistemas Silvopastoriles-VIII Congreso Internacional de Sistemas Agroforestales).
<https://www.researchgate.net/publication/276266931%0ACrecimiento>

Garzón, M. A., & Buelna, G. (2014). *Caracterización de aguas residuales porcinas y su tratamiento por diferentes procesos en México*. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 30(1), 65–79.

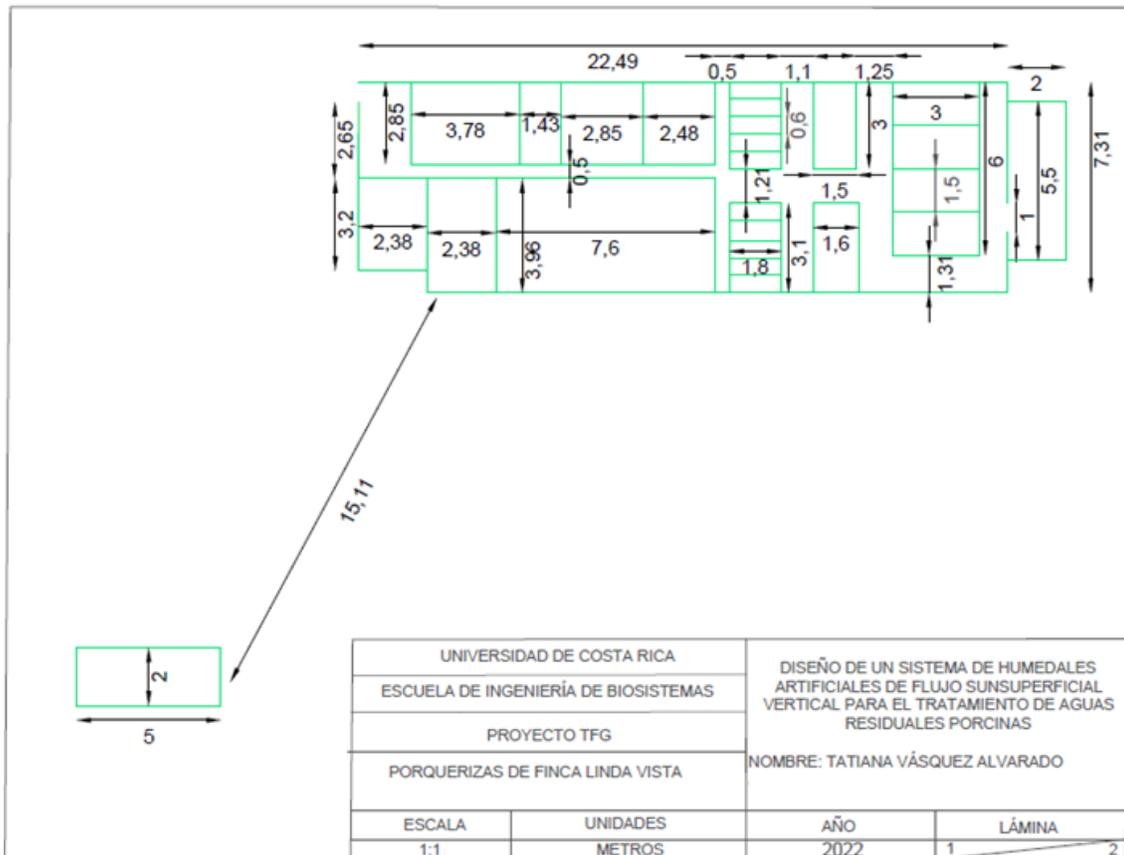
Gomez, G., Salazar, J. P., Hernandez, M. L., Arias, S. A., & Bentancur, F. M. (2010). Fitorremediación con humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales porcinas. *Informador Técnico*, 74(0), 12–22.
http://revistas.sena.edu.co/index.php/inf_tec/article/view/5/5

- González, L., Muñoz, M. Á., Gómez, M., Terrero, M. A., & Cano, Á. F. (2015). *Eficiencia en la depuración de purines de cerdo mediante humedales artificiales, con dos tiempos de retención hidráulica*. *Anuario de Jóvenes Investigadores*, 8, 15–17. <https://upct.portalcientifico.es//documentos/61ce98fcc3865c0408af0cf9>
- Hegg, S. S. (2018). *Evaluación de optimizaciones de sistemas individuales de tratamiento de aguas residuales*. Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Henze, M., van Loosdrecht, M. C. M., Ekama, G. A., & Brdjanovic, D. (2017). *Desarrollo del Tratamiento de Aguas Residuales*. C. M. López Vázquez, G. Buitrón Méndez, H. A. García, & F. J. Cervantes Carrillo (Eds.), En *Tratamiento Biológico de Aguas Residuales: Principios, Modelación y Diseño* (p. 2,3). IWA Publishing. <https://doi.org/10.17345/9788484241027>
- Hoffman, H., Platzer, C., Winker, M., & von Muench, E. (2011). *Revisión Técnica de Humedales Artificiales de flujo subsuperficial para el tratamiento de aguas grises y aguas domésticas*. Agencia de Cooperación Internacional de Alemania, GIZ, Programa de Saneamiento Sostenible ECOSAN.
- Kadlec, R. H. y Knight, R. L. (1996). *Treatment Wetlands*. Lewis Publishers, Boca Raton, FL, USA.
- La Casa del Tanque (2022a). *Bebederos Ecotank*. Recuperado el 21 de setiembre de 2022 de <https://lacasadeltanque.com/costa-rica/producto/bebederos/>
- La Casa del Tanque (2022b). *Tanquetas Schutz*. Recuperado el 21 de setiembre de 2022 de <https://lacasadeltanque.com/costa-rica/producto/tanquetas-schutz/>
- MINAE. *Reglamento de Aprobación y Operación de Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales* Decreto N° 31545-S-MINAE (2016).
- MINAE. *Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales* Decreto N° 33601-MINAE-S, Pub. L. No. N° 33601-MINAE-S (2007).

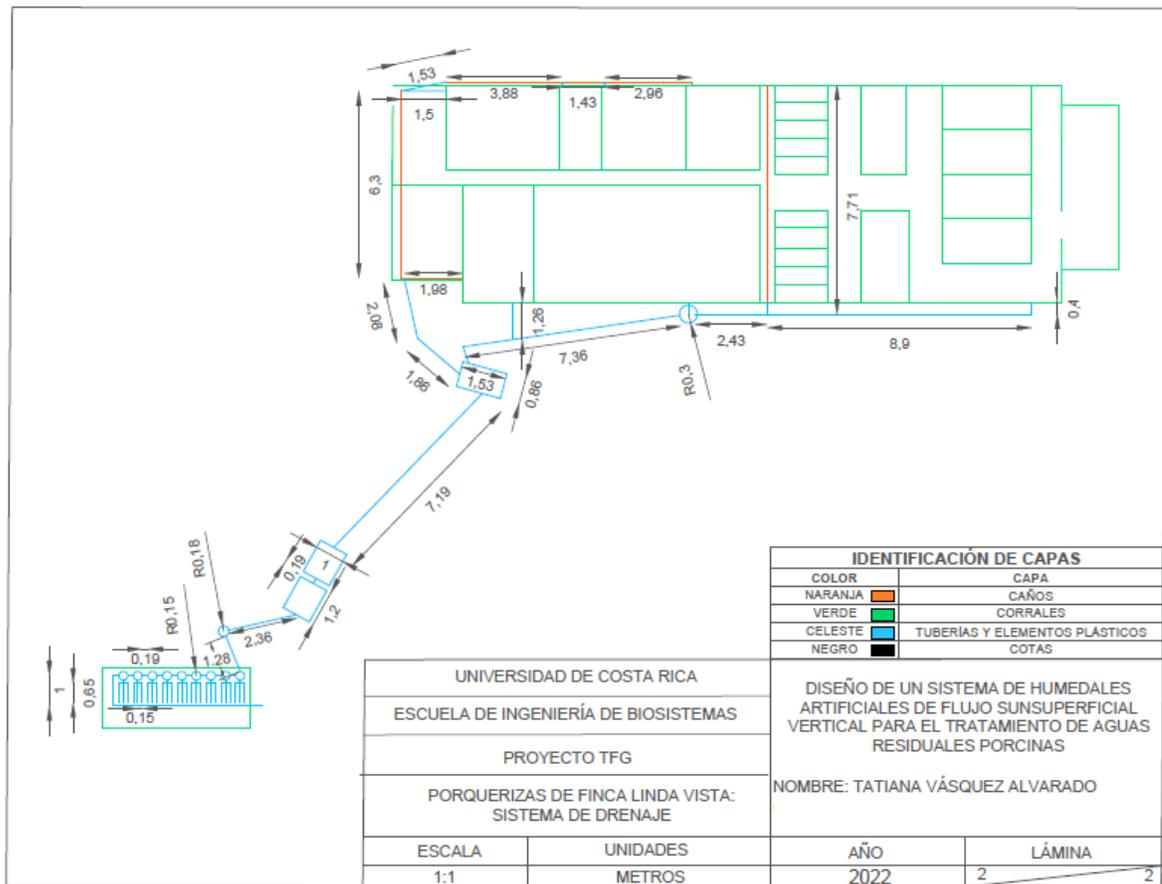
- Padilla, M. (2010). *Consideraciones Sobre el Manejo y Utilización de Remanentes en Granjas Porcinas*. En *Tecnologías Sostenibles Para el Manejo de Remanentes en Granjas Porcinas* (p. 20,21). MAG/SENASA.
- Pérez, T., Pereda, I., Correia, G. T., Pozzi, E., Kwong, W. H., Oliva, D., & Zaiat, M. (2019). *Adición de zeolita en reactor EGSB para el tratamiento de aguas residuales porcinas*. *Infomin*, 11(11901), 1–11.
- Seguel, B. A. (2019). *Evaluación de la Implementación de Humedales Artificiales en Zonas Cordilleranas Utilizando las Especies Cortaderia Selloana y Typha Angustifolia Sobre un Medio Granular de Roca Volcánica*. Universidad del Bio-Bio.
- UN-HABITAT. (2008). *Constructed wetlands manual*. En *Agriculture*. UN-HABITAT Water for Asian Cities Programme. [https://unhabitat.org/sites/default/files/download-manager-files/Constructed Wetlands Manual.pdf](https://unhabitat.org/sites/default/files/download-manager-files/Constructed%20Wetlands%20Manual.pdf) [https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/UN HABITAT 2008 Constructed Wetlands Manual.pdf](https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/UN_HABITAT_2008_Constructed_Wetlands_Manual.pdf)
- Venegas, J. (2020). *Determinación de los parámetros de un Sistema de Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial Vertical Para la Optimización del diseño de Modelos de Caja Negra Bajo Condiciones Tropicales*. Universidad de Costa Rica.
- Vymazal, J. (2009). *The use constructed wetlands with horizontal sub-surface flow for various types of wastewater*. *Ecological Engineering*, 35(1), 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2008.08.016>
- Zapata, Á., & Vargas, J. E. (2014). *Botón de Oro: Manual para su establecimiento y manejo en sistemas ganaderos* (1 ed). Universidad de Caldas. <https://www.researchgate.net/publication/300114148>

ANEXOS

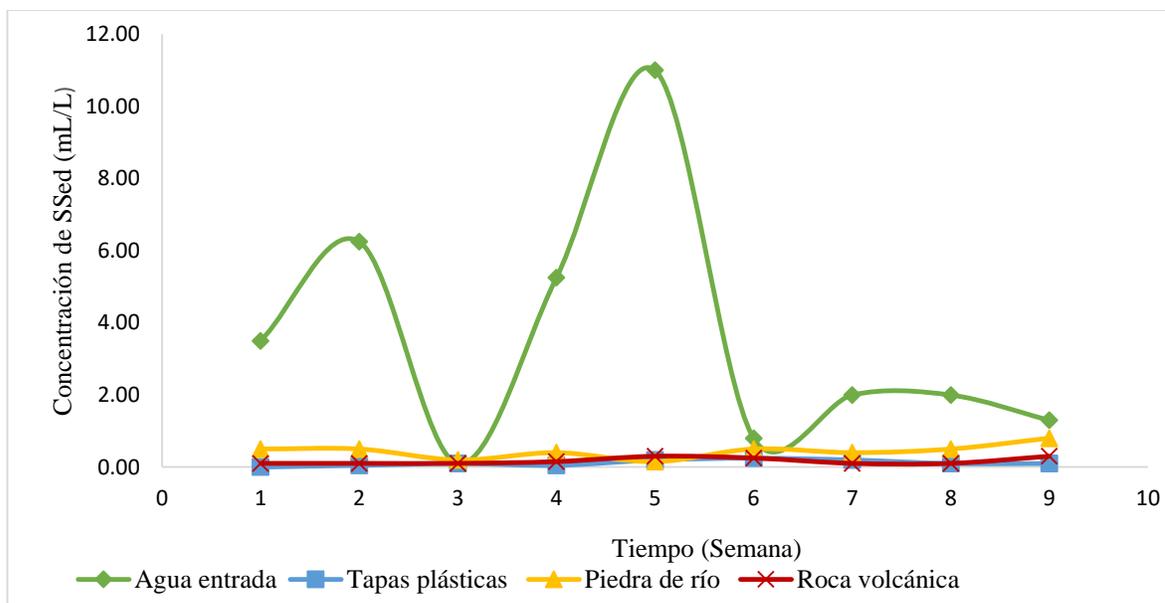
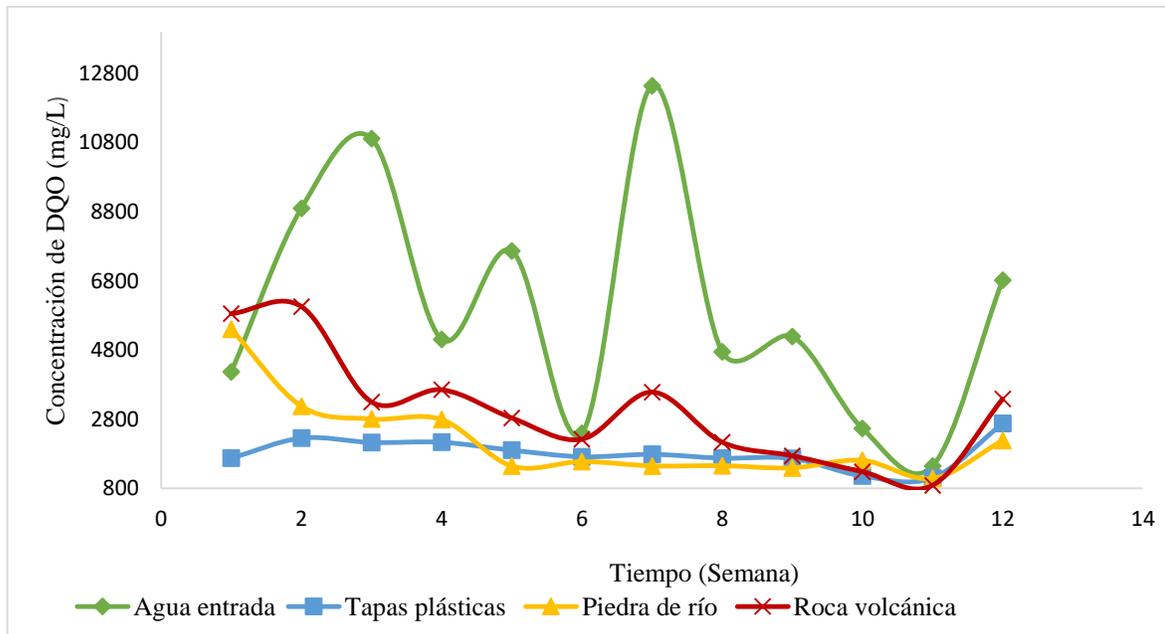
Anexo A. Plano las porquerizas de la Finca Linda Vista y ubicación de la estructura para instalación de humedales piloto.

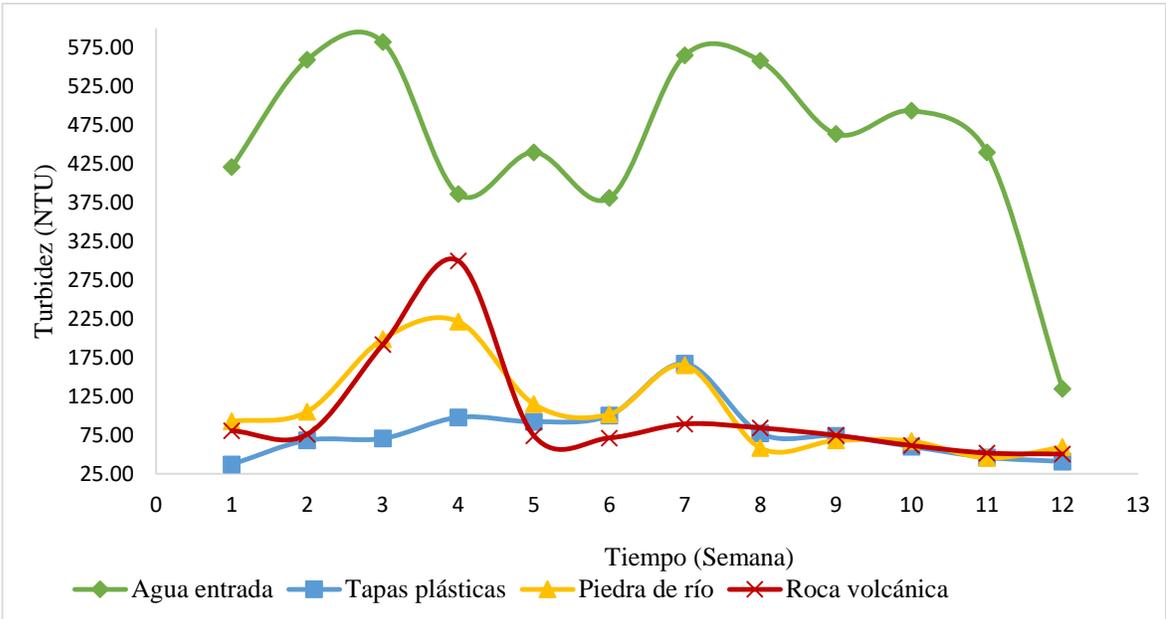
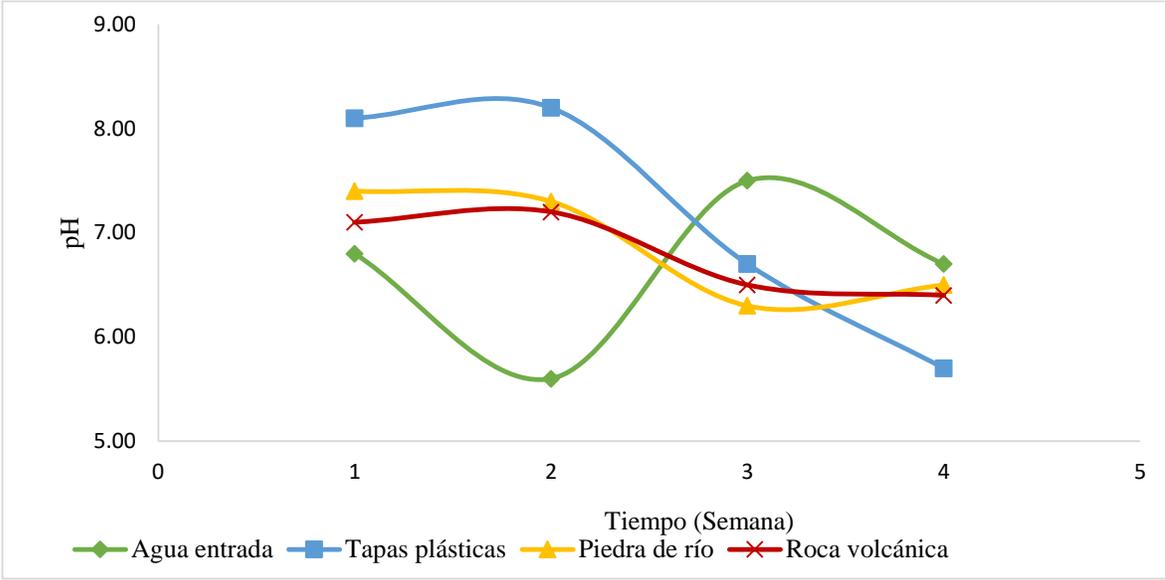


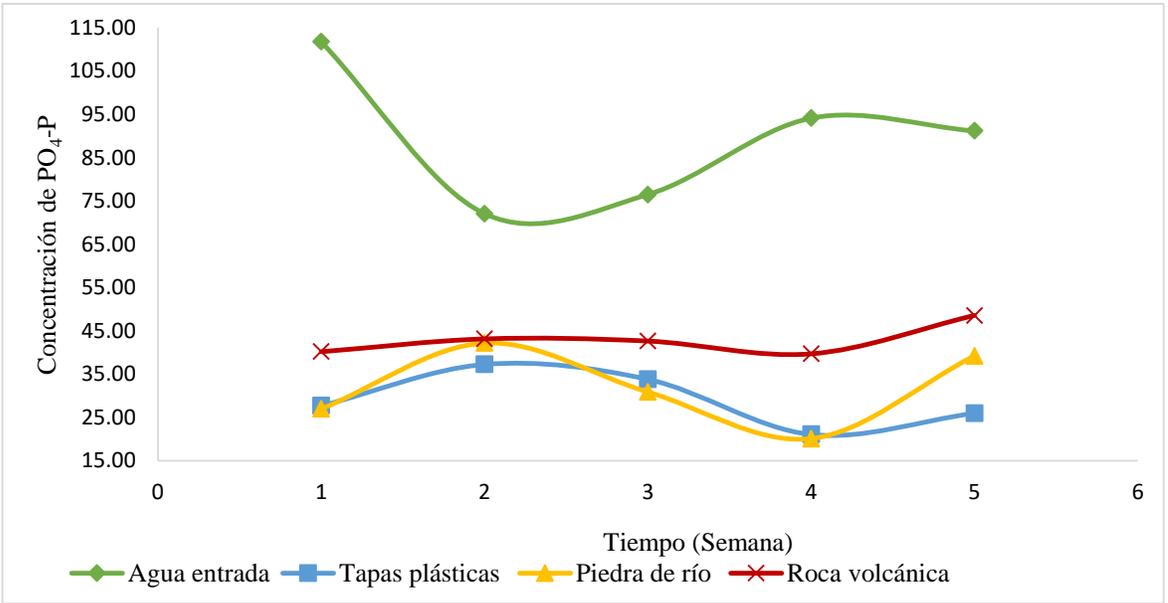
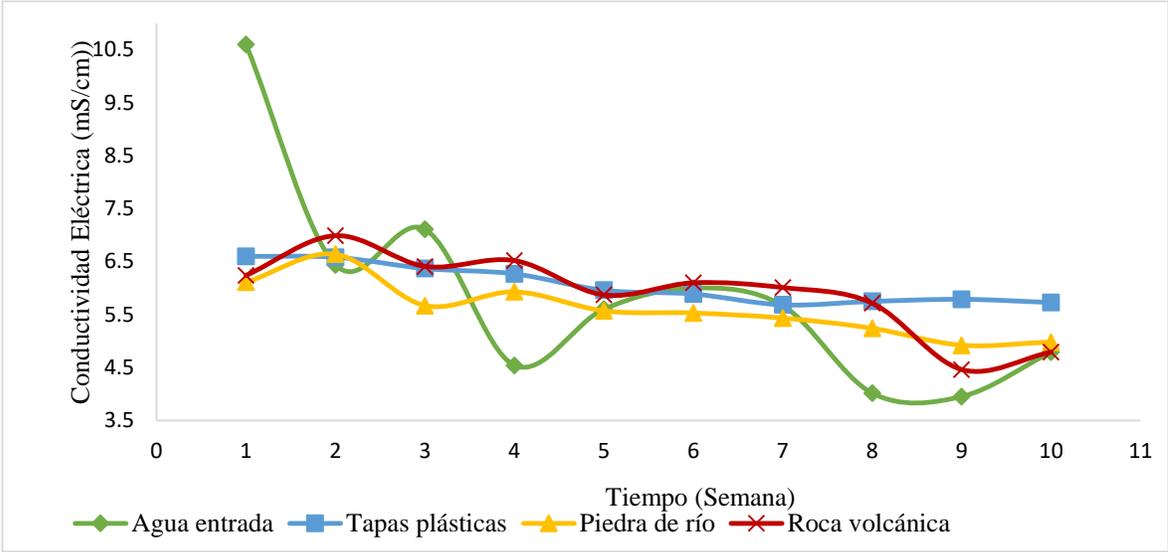
Anexo B. Plano de porquerizas de la Finca Linda Vista con vistas del sistema de drenaje y conexión al sistema de tratamiento piloto.

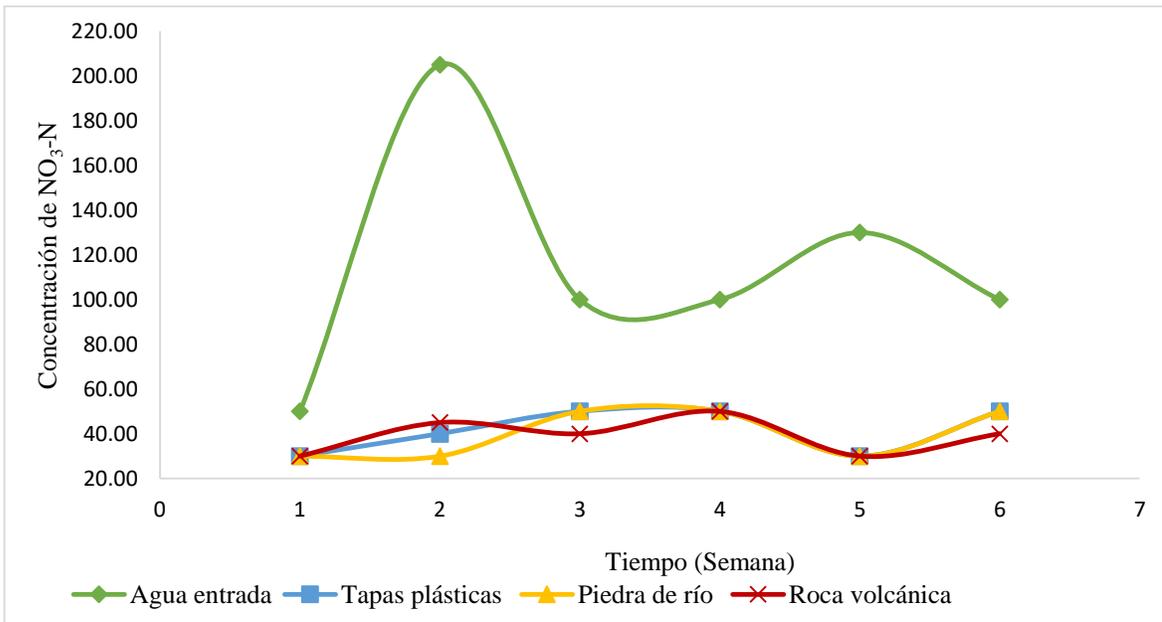
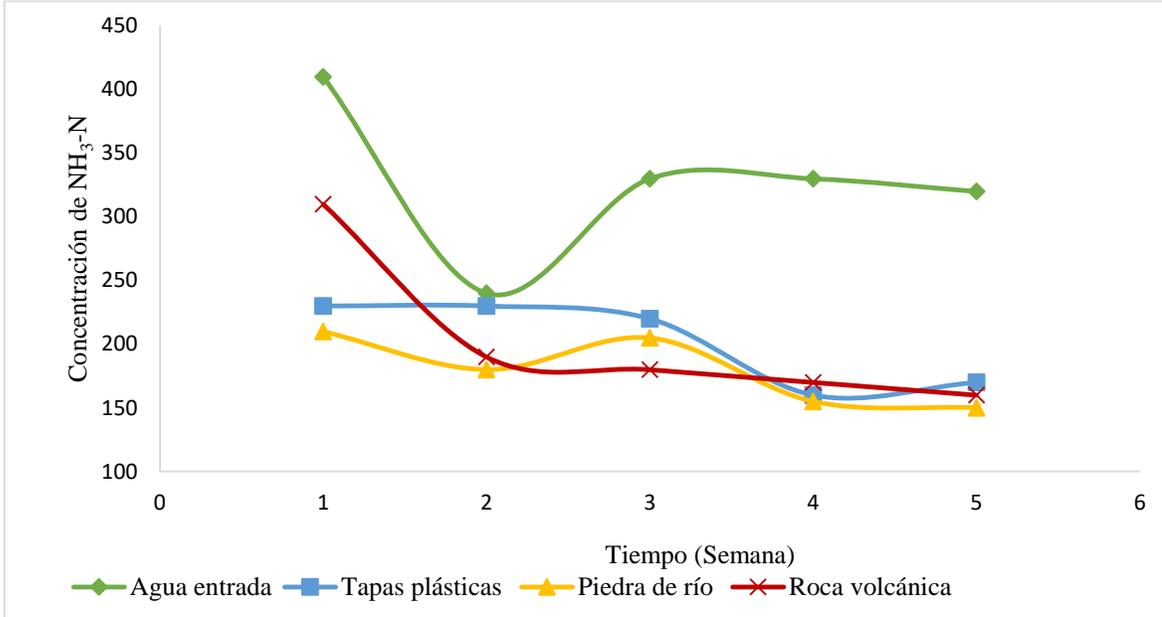


Anexo C. Concentración de los parámetros de calidad de agua residual analizados con respecto al tiempo, del agua de entrada y los efluentes (tapas plásticas, piedras de río y roca volcánica) en el sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial de flujo vertical a escala piloto.









Anexo D. Guía para producción más limpia en la Finca Linda Vista.

GUÍA PARA PRODUCCIÓN MÁS LIMPIA EN EL MANEJO DE RESIDUOS EN LA GRANJA PORCÍCOLA “LINDA VISTA” EN SANTA CRUZ, TURRIALBA

Tatiana Vásquez Alvarado

En Costa Rica, la crianza de cerdos es una práctica que se incrementa constantemente, en el período del 2013-2016 las explotaciones nacionales han experimentado un crecimiento del 6%, pasando de 630.675 cabezas en 2013 a 743.338 en 2016 (Consejo Nacional de Producción, 2016). Sin embargo, el aumento en la cantidad de cerdos implica un crecimiento en la cantidad de residuos, como excretas, que impactan negativamente el ambiente cuando no son tratados (Sabogal & Vargas, 2019).

Por esta razón, es pertinente establecer guías de producción más limpia (PML) basadas en el manejo integrado de residuos, particularmente en fincas donde no se cuenta con sistemas de tratamiento, tal es el caso de la finca Linda Vista. De manera que el interés de este proyecto es dar una guía para la mejora en la producción de la finca Linda Vista que permita aplicar de forma continua las estrategias de PML para mantener sin problemas el permiso de funcionamiento ante las entidades de salud, ambiente y bienestar ambiental, generando además beneficios para la finca.

La PML tiene como propósito evaluar las etapas específicas del proceso de producción para determinar aquellas donde se puedan hacer cambios que permitan un uso más eficiente de las materias primas, de recursos naturales y la reducción de desechos (Varela, 2010). Las estrategias de PML se enfocan en tratar de prevenir la contaminación antes de que se produzca y a la vez aprovechar los residuos que antes se consideraban desecho (Quirós, 2003). Existe una jerarquía u orden en el que se considera deseable aplicar las técnicas de PML: prevención, reducción, reutilización y reciclado, tratamiento con generación de energía y recuperación de materiales. Con este orden se busca reducir los

costos al prevenir la contaminación antes de su generación o de no ser posible prevenirla, al menos reducirla para evitar incurrir en gastos de tratamiento (Varela, 2010).

Esto contribuye también en el incremento de la competitividad de las empresas, ya que al tratar sus residuos en la fuente y no “al final del tubo” se aseguran de que su tratamiento sea menos costoso y la vez se puede obtener beneficios de los subproductos o residuos, generando ingresos con los que antes no se contaba. Así mismo, la percepción social de la empresa mejora considerablemente cuando se trata de una compañía amigable con el ambiente (Varela, 2010). En el caso de las granjas porcícolas, la PML permite disminuir el alto consumo de agua, tener condiciones más aptas para los animales, aprovechar las excretas, reducir la contaminación por altas cargas orgánicas, aprovechar la energía más eficientemente, reducir malos olores y moscas, entre otros.

Es importante mencionar que las empresas deben querer implementar las acciones de PML de manera voluntaria, utilizando como apoyo la legislación ambiental actual (Quirós, 2003). Por lo tanto, para poder llevar a cabo un plan de mejora con PML es necesario que el productor tenga conocimiento de los distintos procesos que lleva a cabo en su empresa, las posibilidades de cambios o implementación de nuevos procesos, cambios de actitud o pensamiento, cambios en la organización, mejoramiento continuo, y una adecuada gestión ambiental ligada a las políticas vigentes (Varela, 2010).

Beneficios de la Producción Más Limpia

Aplicar PML trae consigo beneficios económicos, ambientales y sociales. Los beneficios económicos se relacionan con reducción de costos, aumento de ingresos y necesidad de inversión. Los beneficios ambientales y sociales se relacionan principalmente con la reducción de impactos negativos sobre el ambiente y la percepción de la sociedad de productos amigables con el ambiente. Por ende, todos estos beneficios están estrechamente relacionados entre sí (Sabogal & Vargas, 2019). A continuación, se detallan algunos beneficios económicos, ambientales y sociales.

Tabla 1. Beneficios de aplicar PML en una empresa.

Beneficios Económicos	Beneficios Ambientales	Beneficios Sociales
Mejor aprovechamiento de energía, materias primas y transporte, lo que se traduce en un ahorro.	Se reduce la cantidad de desechos producidos.	Mejora la imagen pública de la empresa.
Mejora la calidad del producto.	Se reduce el uso o producción de materiales tóxicos.	Mejora la salud y seguridad laboral.
Se logra recuperar materiales de alto valor agregado.	Generación de productos amigables con el ambiente.	Se informa y educa a los trabajadores sobre la problemática ambiental y protección de la salud pública.
Aumento en la rentabilidad al mejorar la productividad del capital, mano de obra y materias primas.	Previene la contaminación en la fuente.	
Diversificación de productos, lo que permite explorar nuevos mercados.	Se reduce la cantidad de aguas residuales y se establecen sistemas de tratamiento y disposición ambientalmente responsables.	

PROCESO PRODUCTIVO DE LA FINCA

La Finca Linda Vista en Santa Cruz de Turrialba cuenta con un sistema de producción continuo donde se enfocan en la cría y engorde de adultos para carne. De acuerdo al

Reglamento de Granjas Porcinas N° 30294-S (Reglamento de Granjas Porcinas, 2002), la finca Linda Vista, al contar con entre 100 a 200 cabezas, es considerada como una granja porcina de tipo B-2.

En una granja porcícola de tipo B-2 se distinguen cinco etapas en el proceso productivo. Estas etapas son: reproducción y gestación, cría o lactancia, crecimiento y desarrollo o precebo, y engorde o ceba. A continuación, se detalla cada etapa.

Reproducción y Gestación

Una hembra estará lista para la reproducción luego de 5 a 7 días después de haber sido destetada. Para la reproducción las hembras se colocan en jaulas individuales colocadas cerca del varraco para fomentarles el celo. Una vez entradas en celo, se pasan a las hembras un corral de monta, donde se realiza la inseminación por vías naturales o artificiales. Por la vía natural se realizan de dos a tres montas cada 12 horas. Por la vía artificial se recomienda hacer dos servicios cada 12 horas una vez iniciado el celo. (USAID-CCAD, 2013). La gestación se produce cuando la hembra fue inseminada y no presenta nuevamente el celo, tiene una duración de 114 días (3 meses y medio). Una hembra por lo general produce 3,6 kg/día de estiércol, mientras que el varraco produce 3,0 kg/día (Mariscal, 2007).

Cría o Lactancia

De 7 a 10 días antes del parto, las hembras que se encuentran en la última etapa de gestación son bañadas y se colocan en jaulas de maternidad previamente limpias y desinfectadas. La etapa de cría se inicia en el momento en que nacen los lechones (9 a 12 lechones por parto). Durante 21 días, los lechones se mantienen junto a la madre para ser amamantados. Para los lechones es importante mantener una temperatura entre 25 a 35 °C (USAID-CCAD, 2013), para lo cual se utilizan bombillos de luz amarilla en las jaulas de maternidad. Pasados los 21 días de lactancia se procede al destete paulatino de los lechones:

se alimenta a los lechones con un alimento concentrado hasta que alcancen de 12 a 15 kg de peso. Alcanzado el peso, se suspende completamente la dieta láctea y se maximiza el consumo de concentrado. Una hembra en período de lactancia produce un promedio de estiércol diario de 6,4 kg/día (Mariscal, 2007).

Crecimiento y Desarrollo o Precebo

Esta etapa da inicio con el destete de los lechones y tiene una duración aproximada de 12 semanas, durante las cuales deben alcanzar unos 40 a 50 kg de peso (Cáceres & Forero, 2015). Durante el precebo se da un rápido crecimiento, los cerdos se mantienen en corrales de piso de concreto acondicionados con comederos y bebederos. Se cuenta con alimentación a tiempo completo para lograr su desarrollo adecuado (USAID-CCAD, 2013). Los lechones producen diariamente 0,35 kg/día de estiércol (Mariscal, 2007).

Engorde o Ceba

Durante esta etapa se busca que el cerdo alcance de 90 a 100 kg de peso, lo que se consigue en aproximadamente 2 a 3 meses (Cáceres & Forero, 2015). Una vez alcanzado este peso los cerdos están listos para la comercialización, con lo cual finaliza su ciclo de vida. Los cerdos en etapa de engorde pueden producir diariamente 2,3 kg/día (Mariscal, 2007).

MEJORAMIENTO DE INSTALACIONES

En una granja porcina es importante poder mantener a los cerdos bajo condiciones adecuadas para su desarrollo (Carpio, s.f.). Para esto es necesario contar con galpones o áreas cerradas donde se mantendrán a los animales resguardados de las distintas condiciones ambientales, enfermedades y depredadores. Usualmente se busca que estas instalaciones se encuentren en terrenos altos, secos, en dirección contraria al viento y que cuenten con

suficiente disposición de agua, además que se cuenten con ventilación apropiada (Sabogal & Vargas, 2019). Al reducir la contaminación y mantener condiciones aptas para los animales se logra criar animales sanos, que a su vez representan productos de calidad para consumo humano. La sanidad animal es fundamental para asegurar una menor tasa de mortalidad en las granjas y, por lo tanto, una mayor producción y competitividad, de manera que la limpieza de las instalaciones de cría es muy importante para evitar patógenos y propagación de enfermedades (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), s.f.).

Según lo establecido en decreto N°30294-S (Reglamento de Granjas Porcinas, 2002), una granja porcina debe contar con suficiente abastecimiento de agua potable y una presión que permita el acceso a todas las áreas. Actualmente la finca Linda Vista cuenta con una fuente de agua propia con la cual se llena un tanque de 600 litros dedicado para el lavado de los corrales, la cual se mueve a través de una bomba que permite aplicar presión en la manguera utilizado para el lavado.

Además, las instalaciones cuentan con paredes, pisos, pasadizos y caños de concreto, los cuales permiten la movilización por las instalaciones y la eliminación de los residuos. No obstante, existen grietas y socavamientos tanto en los pisos como en los caños que conducen las aguas residuales, por lo que se deben solucionar estos problemas de forma urgente para evitar la infiltración de aguas residuales en el subsuelo.

Lo ideal es utilizar concreto para rellenar las grietas y huecos que haya en la infraestructura de los corrales, así mismo, se deben reparar los socavamientos que han sufrido los caños para asegurar que se conducen correctamente las aguas. Igualmente, lo recomendable es que todos los caños se encuentren conectados entre sí para lograr conducir las aguas hasta un mismo punto en común por el que saldrá el agua residual de la finca. La superficie de estos caños debe ser lo más lisa posible y contar con un desnivel adecuado para evitar el estancamiento de las aguas de lavado.

REDUCCIÓN DE CONSUMO DE AGUA

En una granja porcina se tienen residuos sólidos y líquidos constantemente, sin embargo, por lo general estos residuos se mezclan a la hora de realizar la limpieza de las instalaciones. Tal es el caso de la finca Linda Vista, donde las labores de limpieza se realizan mediante la aplicación de agua a presión mediante una manguera, con la cual se da el arrastre de los residuos sólidos como excretas y restos de alimento, por lo cual se tienden a incrementar los tiempos de lavado y por ende, la cantidad de agua utilizada.

Como medida correctiva, se propone realizar un cambio en la forma que se realiza la limpieza. Debido a que los pisos son lisos, lo más recomendable es realizar una recolección en seco de los residuos sólidos presentes en los corrales, esto se puede llevar a cabo mediante un barrido con cepillo o escoba hasta reunir los residuos en un solo punto de cada corral para luego recolectarlos mediante una pala con la cual se cargará una carretilla y así facilitar su traslado para un tratamiento posterior (Sabogal & Vargas, 2019).

Al realizar esta recolección en seco diariamente, es posible reducir el consumo excesivo de agua utilizada para el lavado, ya que solo se utilizará el agua posteriormente a esa recolección, de manera que el tiempo de lavado será menor al no tener que arrastrar sólidos de gran tamaño, y por lo tanto, al reducir la cantidad de agua consumida en las operaciones de lavado, también se reducirá la cantidad que deberá ser tratada.

MANEJO INTEGRADO DE RESIDUOS

Las granjas porcinas generan diversos tipos de residuos, los cuales se pueden dividir en orgánicos e inorgánicos. Entre los residuos inorgánicos se tienen jeringas, envases, empaques, entre otros; mientras los residuos orgánicos son considerados los más contaminantes, y son aquellos que se producen en el sistema digestivo de los cerdos, como las heces y orina. También los restos de alimento afectan la calidad del agua a la hora del lavado de los corrales. (Sabogal & Vargas, 2019). A estos residuos generados, principalmente

orgánicos se les conoce también como remanentes, y pueden ser divididos en sólidos y líquidos.

En general, estos remanentes pueden ser aprovechados de alguna manera, por lo que no deben considerarse un desecho o desperdicio, ya que cuentan con altas cantidades de nutrientes. Sin embargo, si no se les da un manejo adecuado pueden generar contaminación del ambiente (Mojica, 2010). Es por esta razón que se debe contar con el tratamiento adecuado para cada tipo de residuo y así alcanzar beneficios como la mejora en la limpieza y sanidad de los animales, evitar molestias de malos olores y proliferación de vectores como moscas, cumplir con la legislación y obtener ganancias económicas a partir de nuevos productos.

Residuos sólidos orgánicos

Los residuos sólidos orgánicos son básicamente las excretas sólidas de los cerdos y los restos de alimento que queden en el piso de los corrales. Según Gómez et al. (2010), estos sólidos representan un 12% de materia seca y algunos estudios estiman una producción de 0,25 kg de DBO por día y 0,75 kg de DQO por día por cada 100 kg de peso vivo. También se ha observado que el principal componente de las excretas de los cerdos es el nitrógeno y su pH se encuentra entre 6 y 8. Estos residuos orgánicos son fácilmente tratables mediante diversas prácticas que incluso requieren poca inversión. Entre los tipos de tratamiento que se les puede dar están:

- Composteo
- Vermicompost
- Ensilado para alimento de animales
- Producción de biogás

En todos estos tipos de tratamiento se lleva a cabo una transformación de los residuos sólidos mediante procesos fermentativos y se da un aumento en la temperatura, por lo que se logra eliminar a los organismos patógenos que pueda contener la materia prima (Mojica, 2010).

-Compostaje

El compostaje es una técnica que utiliza los residuos sólidos orgánicos producidos en la granja en la elaboración de abono orgánico rico en nutrientes, para lo cual se debe dar un procesamiento a gran escala mediante a acción de Microorganismos Eficientes (EM). De manera que se trata de una transformación biológica de bajo costo (Cáceres & Forero, 2015). La excreta de los cerdos se puede aprovechar fácilmente aplicando la técnica de compostaje, e incluso es posible utilizar los residuos obtenidos de separadores de sólidos (USAID-CCAD, 2013).

Inicialmente se debe destinar un área adecuada para la elaboración del compost, preferiblemente ubicada en una zona con fácil acceso y, en caso de lugares con alta presencia de lluvias, procurar que sea un área cubierta con techo. Es posible elaborar las camas sobre el suelo, aunque también se puede hacer en una fosa (Mojica, 2010).

Para poder obtener un material de buena calidad y que el compostaje sea exitoso, es necesario cuidar de aspectos como las proporciones, ya que esta técnica requiere que se mezcle el material sólido orgánico con materia seca como hojarasca, aserrín, residuos de caña, cartón, entre otros. Por lo general la proporción utilizada es de 2 paladas de estiércol por cada palada de material seco. Una vez realizada la mezcla correctamente, se agrega una capa de material seco en la parte superior para que funcione como barrera ante las moscas (USAID-CCAD, 2013).

Se puede continuar agregando nuevo material a las pilas de compostaje siempre que se mantenga la proporción adecuada de sólidos y materia seca, se mezcle bien el material

nuevo con el de la pila y se vuelva a tapar con material seco. Es importante que las pilas no superen 1 metro de altura, cuando se llegue a este punto, se debe iniciar una nueva pila de compostaje (Mojica, 2010). Además, es necesario que haya un suministro adecuado de oxígeno durante todo el proceso, por lo que se deben voltear las pilas de material cada semana (Cáceres & Forero, 2015).

Cuando las pilas hayan alcanzado 1 metro de altura será necesario colocar de manera vertical dos tubos perforados de 2 pulgadas para permitir la evacuación de los gases generados durante el proceso, el cual finaliza una vez que se ha descompuesto todo el material. Se debe llevar un control de la temperatura y de la humedad para que el proceso sea adecuado. La temperatura no debe ser menor a 30 °C y la humedad puede ser medida manualmente tomando un poco de material en la mano y apretando con el puño, si hay exceso de humedad el material escurrirá y es indicador de que se debe agregar más materia seca a la mezcla (USAID-CCAD, 2013).

-Lombricomposta

Los residuos orgánicos de una finca de cerdos también pueden ser transformados en abono mediante la acción de lombrices de tierra. Las especies de lombriz más utilizadas en la elaboración de vermicompost son *Eisenia fetida* y *Eisenia andrei*, más conocidas popularmente como lombriz roja californiana a pesar de ser dos especies distintas. Estas lombrices se alimentan de materia orgánica y consumen hasta tres veces su peso, por lo que son altamente eficaces en la transformación de residuos orgánicos en abono o humus (Mikolic et al., 2018).

Para elaborar una lombricompostera es necesario contar con un recipiente cerrado, debido a que las lombrices son susceptibles a la influencia directa de los rayos solares y tiene enemigos naturales como sapos, ratas, ratones, hormigas y otros, de manera que se deben proteger. Sin embargo, el tamaño del recipiente puede variar y está relacionado al volumen de residuos producidos en la granja (Mojica, 2010).

Antes de comenzar el proceso es importante que las lombrices pasen por una etapa de adaptación con el material que van a transformar, para esto se toma un núcleo básico de lombrices mezcladas con tierra y se le va agregando poco el material orgánico precompostado, en este caso las excretas. Cuando se haya estabilizado la población de lombrices se podrá proceder a la inoculación de las camas o contenedores de mayor tamaño y agregar el material sin necesidad de precompostarlo (Mojica, 2010).

Es recomendable cubrir la parte superior de la lombricompostera con tierra, cartón o restos de pasto para poder mantener la humedad, además de realizar riego en forma de pulverización en caso de que la humedad sea baja. También es importante que se cuente con drenaje adecuado para evitar que la compostera se inunde, ya que se producirán lixiviados, de manera que se debe colocar un colector para esos lixiviados, los cuales pueden volver a incorporarse a la compostera (Mikolic et al., 2018).

Cuando el recipiente se llene, se deja de agregar materia orgánica y se hace un riego cada dos días hasta ver que el material esté listo, que será cuando tenga un color oscuro uniforme, con textura suave, suelto y esponjoso y con olor a tierra húmeda, lo cual sucederá en un período de 3 a 4 meses después de la última vez que se agregó materia orgánica. Para lograr separar las lombrices del material ya terminado se tienen varias opciones: Si se tienen camas conectadas entre sí por malla se deja de regar la cama con material terminado para que las lombrices migren a otra cama donde haya humedad y materia orgánica, cubrir el material de la compostera con malla semisombra y colocar materia orgánica sobre esa malla para que las lombrices suban y puedan ser separadas del compost. Luego de una o dos semanas la mayoría de las lombrices se habrá movido hacia la parte de arriba de la malla y el resto que quede aún en el compost podrá ser separado mediante un tamizaje con zaranda o manualmente (Mikolic et al., 2018).

-Ensilado para alimento de animales

En este caso se busca procesar las excretas mediante una fermentación anaeróbica, con la que se reduce el pH a niveles inferiores a 5 para poder eliminar microorganismos patógenos, virus y parásitos. Con el producto del ensilado de las excretas es posible alimentar a los mismos cerdos, e incluso a animales rumiantes, logrando disminuir costos de alimentación hasta en un 60% en caso de rumiantes (Galindo, 2010).

Para elaborar el ensilado de cerdaza se necesita realizar una mezcla de las excretas sólidas de los cerdos, sorgo o maíz molido o melaza y suero de leche, se coloca la mezcla en un recipiente que puede ser un estañón plástico con capacidad para 100 litros, llenado hasta un 80% de su capacidad. Posteriormente, se tapa la mezcla con un plástico, procurando que quede bien adherido a la mezcla y que la cubra completamente para que quede bien sellado y luego de 24 horas se debe eliminar el gas que se ha acumulado debajo del plástico como producto de la fermentación y se deja reposar por 12 a 18 días, después de los cuales se podrá utilizar en la alimentación de los animales (Castellanos et al., 2010).

-Producción de biogás

El uso de biodigestores para la producción de biogás es una alternativa muy empleada en las fincas pecuarias en la que se busca la fermentación anaeróbica. Se introduce la materia orgánica con agua en un recipiente hermético en donde no ingrese el aire, dentro de este recipiente se lleva a cabo la fermentación mediante la acción de microorganismos facultativos que degradan la materia y producen gases, principalmente metano, el cual se puede aprovechar en la finca. Sin embargo, al finalizar el proceso se obtiene un lodo estabilizado e inactivo que se debe tratar posteriormente. Para la producción de biogás es necesaria un área extensa donde colocar el biodigestor y trabajo diario de personal capacitado para un adecuado manejo de las condiciones de funcionamiento del biodigestor (Sabogal & Vargas, 2019).

Tratamiento de mortalidades

En una finca donde se crían animales es normal tener que lidiar con algunas muertes, ya sea por accidentes, enfermedades, o por el nacimiento de animales muertos, por lo que es común preocuparse por el adecuado manejo de esas mortalidades. Muchas fincas recurren a distintas técnicas como la incineración o enterrarlos, sin embargo, existe una posibilidad para tratar los cuerpos y placentas de manera amigable con el ambiente y a la vez obtener un producto del cual obtener beneficios. Esta alternativa es la de compostaje de cadáveres y se realiza sobre el suelo, por lo que se reduce la necesidad de cavar fosas o quemar los cuerpos de los animales, además se pueden compostar incluso animales de gran tamaño (Bass et al., s.f.).

Se debe colocar una capa de al menos 30 centímetros de material seco, como aserrín u hojarasca con trocitos de madera, bien comprimido que funcionará como base para absorber la humedad de los cuerpos. A los lados y encima de los cadáveres se coloca material como estiércol o ensilaje de pasto con una humedad de 50 a 60% y por último se tapa todo con material fino como tierra mezclada con heno u otro material seco (Bass et al., s.f.).

La altura máxima de la pila formada será de 1,50 metros, y se debe realizar volteos cada 45 días aproximadamente para que se airee la materia. El proceso completo suele tardar cerca de 90 días, por lo que serán necesarios al menos 2 volteos (USAID-CCAD, 2013).

Residuos líquidos

Las aguas residuales son el producto de las actividades de limpieza en una granja de producción porcícola, por lo cual tienen una alta carga orgánica, la cual debe ser tratada correctamente antes de ser liberada al ambiente. Para poder determinar el tipo de tratamiento que requieren las aguas residuales es necesario realizar un muestreo previo, con el que se llevará a cabo un análisis de laboratorio y así poder saber qué tan cerca o lejos se encuentran los parámetros de calidad del agua establecidos por ley para el vertido o reúso de aguas

residuales. Una vez implementado un sistema de tratamiento determinado se deberán tomar muestras representativas tanto a la entrada como a la salida (Padilla, 2010).

Entre los diferentes tipos de tratamiento posibles para aguas residuales de una granja porcina se pueden mencionar:

- Uso de reactores biológicos
- Lagunas de estabilización
- Tanque séptico
- Separador de sólidos con lagunas
- Separador de sólidos con humedales artificiales

El tipo de tratamiento que se vaya a utilizar debe seleccionarse cuidadosamente según las necesidades y capacidad que se tenga. Las diferencias que existen entre cada tratamiento abarcan los costos de construcción y funcionamiento, la tecnología requerida, la capacitación del personal para su manejo adecuado, la necesidad de área, entre otras, por lo que se detallan a continuación los tipos de tratamiento de aguas antes mencionados. Cabe destacar que en un sistema de tratamiento de aguas residuales se debe utilizar varios de los tratamientos descritos con una distribución recomendada por un profesional técnico.

-Reactores biológicos

Se trata de un sistema en el que se cuenta con un lecho por el cual atraviesa el agua a baja velocidad, mientras que se decantan los lodos. Los lodos se van floculando (uniendo en forma de gránulos) y forman un manto en el que se desarrolla una serie de microorganismos descomponedores. Esa descomposición se da mediante la digestión anaerobia, la cual genera gases que agitan el manto constantemente. Existen diferentes configuraciones de reactores, siendo los reactores anaerobios de flujo ascendente (RAFA) uno de ellos, con el cual se consigue un tratamiento adecuado con un tiempo de retención hidráulico menor que en otras

tecnologías, pero con costos asociados de construcción y operación más elevados (MARN, 2016).

-Lagunas de estabilización

Las lagunas se consideran sistemas de fácil diseño y construcción (Hoffman et al., 2011), ya que se trata de excavaciones en la tierra donde se coloca una geomembrana impermeable que permita contener el agua en ese punto. Por lo general, se colocan varias lagunas en serie y el agua va pasando a través de ellas en un determinado tiempo de retención que permita la sedimentación de sólidos y la acción de microorganismos, hongos y algas. Es común que se cuente con un sistema que incluya primero una laguna anaerobia, luego una laguna facultativa y finalmente una laguna de maduración.

En las anaerobias, la alta carga orgánica con que entran las aguas favorece que se dé la digestión anaerobia en los lodos sedimentados, por lo que deben purgar cada cierto tiempo. En las facultativas se inicia la aparición de microalgas que permiten la degradación aerobia de la materia orgánica en la parte superior de las lagunas, en la parte media se desarrollan bacterias facultativas que llevan a cabo la nitrificación-desnitrificación, y en el fondo se continúa con la digestión anaerobia. Las lagunas de maduración se construyen con profundidades bajas para propiciar que la radiación UV genere un efecto bactericida, lo cual conlleva a la eliminación de patógenos, además se termina de degradar los contaminantes de manera aerobia (MARN, 2016). Muchas fincas aplican este tipo de sistemas de tratamiento, sin embargo, requieren grandes áreas para su construcción y el agua se encuentra en contacto con el ambiente por lo que, al tratar excretas pueden resultar inconveniente.

-Tanque séptico

Son más utilizados en fincas pequeñas y consiste en la instalación de fosas que van enterradas en el suelo. Se considera un tratamiento primario que permite la separación física

de sólidos mediante sedimentación y grasas mediante flotación, además se da una estabilización biológica mediante digestión anaerobia de los lodos generados, de manera que deben contar con respiraderos para evacuar los gases producidos. Este tipo de tratamiento requiere un tratamiento posterior, y por lo general se utilizan drenajes con piedras o llantas, que liberan esas aguas al suelo, lo cual resulta inconveniente desde un punto de vista ambiental (MARN, 2016).

-Separador de sólidos con lagunas

Los separadores de sólidos son más conocidos como sedimentadores primarios, sin embargo, se diferencian de los tanques sépticos en que éstos no almacenan los lodos, sino que hay que removerlos cada cierto tiempo para evitar malos olores y un aumento en la demanda de oxígeno. Estos sistemas funcionan por gravedad, pueden ser dinámicos o estáticos, siendo más utilizados los últimos debido a su bajo costo en instalación y mantenimiento (MARN, 2016). Las aguas que salen de estos sedimentadores pueden ser tratadas previamente con diversos métodos, siendo el lagunaje uno de los más implementados por la sencillez de su funcionamiento y bajo costo.

-Separador de sólidos con humedales artificiales

Los sistemas de humedales artificiales son un tratamiento secundario o terciario de fácil implementación. En caso de fincas ganaderas y porcícolas, se pueden implementar como tratamiento posterior al tratamiento primario con sedimentares. Los humedales de flujo subsuperficial vertical permiten tratar las aguas residuales con altas cargas orgánicas y no requieren de áreas extensas, además de que el agua residual no estará nunca en contacto con el ambiente, pues se mantiene un espejo de agua por debajo de la superficie del material de relleno de los humedales(MARN, 2016), de manera que se evita la proliferación de vectores como moscas y mosquitos y malos olores (Hoffman et al., 2011).

En los humedales de flujo vertical el agua corre desde la parte superior del material filtrante hasta el fondo, por lo que no se requieren áreas muy extensas para su implementación, ya que lo que se busca es profundidad, no longitud. Además, estos humedales sufren menos por colmatación (MARN, 2016), por lo que su mantenimiento es menos frecuente que en el caso de los humedales de flujo horizontal.

BITÁCORA

En todas las fincas de producción de cerdos del país, es obligatorio llevar un registro de los valores medidos de operación del sistema de tratamiento de aguas residuales. Se miden parámetros básicos como caudal, pH, temperatura y sólidos sedimentables, con los cuales se puede determinar si el sistema está funcionando correctamente y cumple los límites establecidos en el Reglamento de Vertido y Reúso de Aguas Residuales.

Estos valores deben anotarse en un libro bitácora, para lo cual se debe contar con tablas específicas, ya establecidas para solamente tener que llenar con la información necesaria, y de esta manera llevar un mejor orden y control de los datos recopilados. En las siguientes tablas se muestran ejemplos de formatos que se pueden seguir para el manejo de la información, no solo del tratamiento de aguas residuales, sino también del consumo de agua y el manejo de residuos sólidos.

Para las mediciones de la tabla 2 se mide el caudal que sale de la manguera utilizada para el lavado de los corrales de los cerdos, utilizando un recipiente de volumen conocido y midiendo el tiempo que toma llenarlo. Además, se debe anotar la hora de inicio y finalización de la limpieza, iniciando en el momento en que se abre la llave del agua y finalizando cuando se cierra y el agua deja de correr.

En el caso de los residuos sólidos, se recomienda pesar la cantidad de materia recolectada en cada una de las unidades que tiene la finca para determinar cuáles son las que producen más excretas y llevar un mejor control, aunque también se puede pesar el total de

la materia sólida una vez recolectada. Se recomienda también anotar el tipo de tratamiento que se le dará a esos residuos, sea compostaje, ensilaje u otro. Es recomendable realizar estas mediciones de manera quincenal

Tabla 2. Medición de caudal de agua consumida para lavado.

Fecha	Cantidad de cerdos	Hora de inicio	Volumen de recipiente (Litros)	Tiempo de llenado (seg)	Tiempo de llenado (min) $t = t_{seg} * (1/60)$	Hora de finalización	Caudal medido (L/min)

Tabla 3. Medición de cantidad de residuos sólidos recolectados en limpieza.

Fecha	Unidad	Cantidad de cerdos	Peso de materia (kg)	Tipo de tratamiento								
	1											
	2											
	3											
	4											
	5											
	6											
	7											
	8											
<table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr> <td rowspan="2" style="width: 20px;">8</td> <td rowspan="2" style="width: 20px;">7</td> <td style="width: 20px;">3</td> <td style="width: 20px;">2</td> <td style="width: 20px;">1</td> </tr> <tr> <td>6</td> <td>5</td> <td>4</td> </tr> </table>					8	7	3	2	1	6	5	4
8	7	3	2	1								
		6	5	4								

Los parámetros medidos en el sistema de tratamiento deben ser tomados antes y después de ser tratada el agua residual para saber si está funcionando correctamente, además se puede comparar esa información con los límites de vertido y reúso de aguas residuales establecidos por decreto en el país. Se deben realizar estas mediciones de manera mensual, con el fin de llevar un registro apropiado y asegurar que se da un tratamiento adecuado a las aguas residuales de la finca, además de poder determinar el momento en que el sistema requiera mantenimiento.

Tabla 4. Reporte de datos del tratamiento de aguas residuales.

Fecha	Caudal entrada (L/min)	pH inicial	Temperatura (°C)	Sólidos sedimentables (mL/L)	Caudal salida (L/min)	pH final	Sólidos sedimentables (mL/L)

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bass, T., Colburn, D., Davis, J., Deering, J., Fisher, M., Flynn, R., Lupis, S., Norton, J., Schauerhmann, N., Bonhotal, J., Dafoe, J., & Joshua, P. (s.f.). *Compostación de Ganado Muerto Para Instalaciones Grandes y Pequeñas en el Oeste Semiárido*. Universidad del Estado de Montana.
- Cáceres, C. A., & Forero, D. J. (2015). *Plan de manejo ambiental (PMA) para el proceso de producción porcícola, una alternativa de producción más limpia en la vereda La Aguadita (Fusagasuga, Cundinamarca)* [Universidad Libre, Bogotá, Colombia]. https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/7963/PLAN_DE_MANEJO

AMBIENTAL PARA EL PROCESO DE PRODUCCIÓN PORCÍCOLA EN LA VEREDA LA AGUADITA %281%29.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Carpio, A. (s.f.). *Instalaciones para cría de cerdos: diseño y planificación de granjas porcinas*. Recuperado el 11 de noviembre, 2021, de <https://razasporcinas.com/instalaciones-para-cria-de-cerdos-diseno-y-planificacion-de-granjas-porcinas/>

Castellanos, A., Salazar, G., Hernández, P., Domínguez, G., & Barrera, G. (2010). *Uso de ensilado de cerdaza en la alimentación animal*. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Centro de Investigación Regional Pacífico Centro, Campo Experimental Centro-Altos de Jalisco. <https://docplayer.es/39954731-Uso-de-ensilado-de-cerdaza-en-la-alimentacion-animal.html>

Consejo Nacional de Producción. (2016). *Mercado de carne de cerdo*.

Galindo, A. J. (2010). *Modelos de aprovechamiento de excretas de granjas porcinas*.

Gomez, G., Salazar, J. P., Hernandez, M. L., Arias, S. A., & Bentancur, F. M. (2010). Fitorremediación con humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales porcinas. *Informador Técnico*, 74(0), 12–22. http://revistas.sena.edu.co/index.php/inf_tec/article/view/5/5

Hoffman, H., Platzer, C., Winker, M., & von Muench, E. (2011). *Revisión Técnica de Humedales Artificiales de flujo subsuperficial para el tratamiento de aguas grises y aguas domésticas*. Agencia de Cooperación Internacional de Alemania, GIZ, Programa de Saneamiento Sostenible ECOSAN.

Mariscal, G. (2007). Tratamiento Excretas Cerdos. *FAO, Producción Porcina*, 1–9. www.fao.org/wairdocs/LEAD/X6372S/x6372s08.htm

MARN. (2016). *Recomendaciones para la selección de tratamientos de depuración de aguas residuales urbanas en la República de El Salvador* (M. Unidad de Comunicaciones

(ed.)).

Mikolic, C., Andreoni, I., Ruffinelli, S., Gómez, A., Dárdano, B., Basile, D., & Jorge Escudero, G. (2018). *Manual De Vermicompostaje: Cómo reciclar nuestros residuos orgánicos*. En Montevideo Ambiente (pp. 1–208). <https://montevideo.gub.uy/sites/default/files/biblioteca/imvermicompostajeinterior.pdf>

Reglamento de granjas porcinas, Ministerio de Agricultura y Ganadería 3 (2002). <http://www.mag.go.cr/legislacion/2002/de-30294.pdf>

Mojica, F. (2010). *Producción de abono orgánico a partir de remanentes porcinos*. En *Tecnologías Sostenibles Para el Manejo de Remanentes en Granjas Porcinas* (pp. 23--27). Ministerio de Agricultura y Ganadería.

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (s.f.). *Sanidad Animal*. Recuperado el 11 de noviembre, 2021 de https://www.fao.org/animal-health/es/?ADMCMDD_view=1#:~:text=La FAO considera que la sanidad animal es,criadores de ganado en los países en desarrollo.

Padilla, M. (2010). *Consideraciones Sobre el Manejo y Utilización de Remanentes en Granjas Porcinas*. En *Tecnologías Sostenibles Para el Manejo de Remanentes en Granjas Porcinas* (p. 20,21). MAG/SENASA.

Quirós, K. (2003). *Costa Rica: una experiencia de manejo ambiental innovadora* (J. M. Blanco (ed.)).

Sabogal, N., & Vargas, F. S. (2019). *Priorización De Oportunidades De Producción Más Limpia Enfocadas En Incrementar La Eficiencia Del Proceso Productivo De La Granja Porcícola “Agrocachaca” En La Vereda San José De Nocaima, Cundinamarca Para Mejorar Su Desempeño Ambiental*. Universidad El Bosque, Bogotá, Colombia.

USAID-CCAD. (2013). *Manual Regional de Buenas Prácticas de Producción Más Limpia en Granjas Porcinas*. Comisión Centroamericana de Ambiente y Desarrollo.

Varela, I. (2010). *Producción más Limpia en Granjas Porcinas*. En *Tecnologías Sostenibles Para el Manejo de Remanentes en Granjas Porcinas* (pp. 7–12). Ministerio de Agricultura y Ganadería.