

Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano
Departamento de Ambiente y Desarrollo
Ingeniería en Ambiente y Desarrollo



Proyecto Especial de Graduación

**Análisis de la demanda hídrica y eficiencia en depuración del
efluente residual de la planta porcina de Zamorano**

Estudiante

Sofía Isabel González Martínez

Asesores

Victoria Cortés, Dra.

Erika Tenorio, M.Sc.

Lourdes Espinal, Ing.

Honduras, julio 2022

Autoridades

TANYA MÜLLER GARCÍA

Rectora

ANA MARGARITA MAIER

Decana Académica

ERIKA TENORIO MONCADA

Directora Departamento Ambiente y Desarrollo

HUGO ZAVALA MEMBREÑO

Secretario General

Agradecimientos

Le agradezco a Dios por ser el centro de mi vida, mi fortaleza y guía durante todo el proceso de aprendizaje y preparación del estudio.

Le agradezco al M.Sc. Rogel Castillo y a la encargada del Aprender Haciendo la Ing. Sheila Ramos en conjunto con el equipo de la unidad por brindar acceso y asistencia en la recopilación de datos en la planta de ganado porcino de la Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano.

Le agradezco a mis asesoras, la Dra. Victoria Cortés, la M.Sc. Erika Tenorio y la Ing. Lourdes Espinal por orientarme durante el desarrollo de la investigación.

Le agradezco al equipo de laboratorio de calidad de agua y bioenergía del departamento de Ambiente y Desarrollo por equipar y orientar en todo momento para el desarrollo de los análisis de laboratorio.

Contenido

Agradecimientos	3
Índice de Cuadros	6
Índice de Figuras	7
Índice de Anexos	9
Resumen	11
Abstract	12
Introducción.....	13
Metodología	17
Área de Estudio.....	17
Alcances de Estudio e Indicadores de Desempeño	17
Estimación de la Demanda Hídrica	19
Huella Hídrica.....	20
Estimación de Pesos de los Animales.....	20
Demanda Hídrica y Categorías de Uso	21
Huella Hídrica Gris por Jornada.....	22
Eficiencia en Remoción de Sólidos y Materia Orgánica.....	25
Descripción de Unidades de Tratamiento	25
Toma de Muestras	27
Resultados y Discusión.....	30
Demanda Hídrica	30
Registros de Consumo	30
Huella Hídrica Azul	32

Demanda Hídrica por Operaciones en la Planta de Ganado Porcino	34
Huella Hídrica Gris por Jornada.....	39
Concentraciones del Efluente	39
Eficiencia en Remoción de Materia Orgánica y Sólidos.....	45
Remoción por Unidades de Tratamiento	45
Otros Hallazgos	52
Conclusiones.....	54
Recomendaciones.....	55
Referencias	56
Anexos	60

Índice de Cuadros

Cuadro 1 Metodología para análisis de muestras en campo y laboratorio.	19
Cuadro 2 Métodos de cuantificación para la demanda hídrica en los procesos en la planta porcina.	20
Cuadro 3 Características de las muestras puntuales.	24
Cuadro 4 Características de las muestras compuestas.	28
Cuadro 5 Demanda hídrica por ingesta por individuos en la granja al para el muestreo 1 (3 de mayo del 2022).	33
Cuadro 6 Demanda hídrica por ingesta de alimento para la población de la granja el muestreo 2 (27 de mayo del 2022).	33
Cuadro 7 Clasificación de consumo de agua en la granja porcina para el muestreo 1 (3 de mayo)...	35
Cuadro 8 Fracción de agua consumida en la jornada matutina del muestreo 2 (27 de mayo del 2022).	36
Cuadro 9 Cálculos de los pesos aproximados del total de animales para el muestreo 1 (3 de mayo del 2022).	38
Cuadro 10 Cálculo de los pesos aproximados del total de animales para el muestreo 2 (27 de mayo del 2022).	38
Cuadro 11 Resultados de los sólidos totales, sólidos suspendidos totales y DQO presentes en el efluente durante el muestreo 1 (3 de mayo del 2022).	40
Cuadro 12 Resultados del análisis de sólidos totales, sólidos suspendidos totales y DQO en distintos puntos del efluente durante la jornada matutina durante el muestreo 1 (27 de mayo del 2022).	42
Cuadro 13 Comparación de eficiencia en depuración de materia orgánica y sólidos del efluente a través de distintas unidades de tratamiento de la planta.	47
Cuadro 14 Comparación de la eficiencia en remoción de sólidos totales, sólidos suspendidos, sólidos sedimentables y demanda química de oxígeno durante los meses de marzo y abril.	50

Índice de Figuras

Figura 1 Ubicación de la planta porcina de la Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano.	17
Figura 2 Diagrama de flujo de la dinámica del efluente dentro y fuera del sistema de tratamiento de la granja porcina.	23
Figura 3 Diagrama de flujo para los puntos de muestreo dentro del sistema de tratamiento de aguas residuales de la granja de cerdos.	27
Figura 4 Consumo mensual promedio de agua durante los años 2015 al 2021.	30
Figura 5 Comparación de consumo de agua de los meses en que se llevó el estudio 2022 con el promedio mensual de los años 2015 a 2021.	32
Figura 6 Gráfico para la fracción de agua consumida durante la jornada matutina del muestreo 1 (3 de mayo del 2022).	35
Figura 7 Gráfico de la fracción de agua consumida durante la jornada matutina del muestreo 2 (27 de mayo del 2022).	37
Figura 8 Representación gráfica del contenido de sólidos totales, sólidos suspendidos totales y DQO en el efluente durante el muestreo 1 (3 de mayo del 2022).	41
Figura 9 Representación gráfica del análisis de sólidos totales, sólidos suspendidos totales, y DQO durante la jornada matutina durante el muestreo 2 (27 de mayo del 2022).	42
Figura 10 Comparación de la huella gris del efluente tratado en el punto del Eco-sendero, considerando la concentración actual presente en el cuerpo receptor.	44
Figura 11 Distribución de los datos de sólidos totales conforme a los puntos muestreados del efluente.	46
Figura 12 Comparación de remoción de sólidos suspendidos totales en cada punto de muestreo. .	49
Figura 13 Gráfico de remoción de sólidos totales (ST), sólidos suspendidos totales (SST) y demanda química de oxígeno (DQO).	51
Figura 14 Formación calcárea en la caja de registro del efluente a la salida del biodigestor.	52

Figura 15 Formación de sarro en la tubería a la salida de la laguna #2 de cerdos..... 53

Índice de Anexos

Anexo A Diseño de la fosa de acopio de la planta porcina	60
Anexo B Separador de sólidos o tamizador de la planta porcina de Zamorano.	61
Anexo C Biodigestor de la planta porcina de Zamorano.	62
Anexo D Laguna #1 (anaerobia) de la planta porcina.....	63
Anexo E Laguna #2 de la planta porcina.	64
Anexo F Filtros de grava y arena de flujo ascendente.....	65
Anexo G Biofiltro de Valeriana (Vetiveria zizanioides) y Heliconias (Heliconia L.).....	66
Anexo H Monitoreo del consumo diario de la planta porcina durante febrero y mayo del 2022.	67
Anexo I Gráfico del consumo de agua por grupos de Aprender Haciendo durante el tiempo del estudio.	68
Anexo J Tuberías de charcas abiertas para las labores de limpieza en el edificio del Engorde 1.....	69
Anexo K Punto de salida del “rebalse de la laguna #2” durante las jornadas de muestreo de la huella hídrica.....	70
Anexo L Ruta de salida proveniente del punto de rebalse laguna #2.....	71
Anexo M Parámetros in-situ de los puntos en la ruta del efluente muestreada para el día 3 de mayo.	72
Anexo N Parámetros in-situ de los puntos en la ruta del efluente para el 27 de mayo.	73
Anexo O Anegamiento del efluente de la planta porcina en el canal del Eco-sendero.	74
Anexo P Comparación de sólidos sedimentables por el método de conos Imhoff durante 1 hora.....	75
Anexo Q Comparación visual del efluente en el punto de salida de los biofiltros.....	76
Anexo R Parámetros in situ promedio de los puntos del efluente a través de las distintas unidades de tratamiento.....	77
Anexo S Resumen de resultados de los sólidos totales en distintos puntos del efluente entre los muestreos de marzo y abril.	78

Anexo T Resumen de resultados de los sólidos suspendidos totales en distintos puntos del efluente entre los muestreos de marzo y abril.	79
Anexo U Resumen de resultados de la demanda química de oxígeno (DQO) en distintos puntos del efluente entre los muestreos de marzo y abril.	80

Resumen

La actividad pecuaria de ganado porcino mantiene gran dependencia e impacto sobre el recurso hídrico. La planta porcina de Zamorano al ser de carácter intensivo asocia sus consumos principalmente a la operación, mantenimiento y rutinas de limpieza. En este sentido, el siguiente trabajo cumplió con el propósito de determinar la demanda hídrica en esta planta aplicando la metodología de cálculo de huella hídrica azul. Asimismo, se estimó el impacto generado por descarga de efluentes residuales al cuerpo receptor mediante el cálculo de la huella gris por jornada de 4 horas operativas, y finalmente, se evaluó el desempeño de unidades de tratamiento a partir del cálculo de eficiencia de remoción de sólidos totales, sólidos suspendidos y la Demanda Química de Oxígeno. Para el cálculo de la demanda hídrica y huella gris se trabajó con registros históricos y datos de dos muestreos independientes con muestras puntuales. Para el análisis de eficiencia, se recolectaron muestras compuestas en la salida de las unidades de tratamiento durante los meses de marzo y abril. Se encontró una demanda de agua mensual promedio de 1,061 m³ durante los años 2015 y 2021. Para las fechas evaluadas, la huella hídrica azul fue de 0.23 y 0.29 l/kg de peso vivo-jornada, y la huella hídrica gris vinculada a la DQO fue de 52.27 y 14.71 m³/jornada. Finalmente, en el sistema completo se obtuvo una reducción de 84.85% del ST, 97.60% de SST, y 96.04% de DQO, encontrando que el biodigestor fue unidad de tratamiento que reportó el mejor desempeño.

Palabras clave: Contaminación, Demanda Química de Oxígeno (DQO), huella hídrica, uso del agua, tratamiento de aguas residuales.

Abstract

Swine production maintains great dependence and impact on water resources. Zamorano's swine production plant, being intensive in nature, associates its water consumption mainly with operation, maintenance, and cleaning routines. Therefore, the following work fulfilled the purpose of determining the water demand in the Zamorano swine production plant by applying the blue water footprint calculation methodology. Likewise, the impact generated by the discharge of residual effluents to the receiving body was estimated by calculating the gray footprint per 4-hour operating day, and finally, the performance of treatment units was evaluated based on the calculation of the removal efficiency in total solids, suspended solids, and Chemical Oxygen Demand. For the calculation of the water demand and gray footprint, historical records, and data from two independent samplings with individual samples were used. To evaluate the efficiency, composite effluent samples were collected at the treatment unit's outlets during March and April. It was found that the average monthly water demand was 1,061 m³ between the period 2015 and 2021. For the selected dates, the blue water footprint was 0.23 and 0.29 l/kg live weight-day, and the gray water footprint associated with the COD it was 52.27 and 14.71 m³/day. Finally, a global reduction of 84.85% of TS, 97.60% of TSS, and 96.04% of COD was obtained for the entire treatment, finding that the biodigester was the treatment unit that reported the best performance.

Keywords: Chemical oxygen demand (COD), pollution, water footprint, water use, wastewater treatment.

Introducción

El agua representa un recurso natural de vital importancia para el bienestar social, económico y ecológico de las civilizaciones. Además, su acceso es vital para el correcto desempeño de diferentes actividades, procesos productivos a nivel mundial, y se considera un indicador de desarrollo (Morris, 2019). Según pronósticos de la UNESCO, el consumo del agua aumenta a un ritmo constante de 1% por año (Koncagül et al., 2020). Sin embargo, por causa del cambio climático, la disponibilidad de este recurso es cada vez más deficiente y limitada. La correcta gestión del agua es determinante para impulsar el desarrollo sostenible, ya que se vincula a diferentes objetivos planteados por las Naciones Unidas como de la salud y bienestar humano (ODS#3), agua limpia y saneamiento (ODS#6) y la producción y consumo responsable (ODS#12).

Según reportes del Banco Mundial (2021), el 70% de la demanda de agua del planeta se destina para uso agrícola y el 8.8% se destina para actividades pecuarias. Más que un recurso clave para la producción de los alimentos concentrados o granos básicos, el agua es suministrada *ad libitum* para los animales, cuya demanda varía de acuerdo con la edad fisiológica y las especies (Gadomski, 2021). Al mismo tiempo, es el recurso clave para los procesos de sanitización e higiene de una granja o unidad productiva de carácter intensivo. Por tal motivo, es de gran relevancia conocer su demanda y el impacto que esta representa en el ciclo de la producción a través de la estimación de indicadores ecológicos que faciliten el planteamiento de medidas para su aprovechamiento de forma responsable (Malca Amaya, 2018).

De acuerdo con Cerón Hernández et al. (2020), “la Huella Hídrica es un indicador de sustentabilidad que cuantifica la cantidad de agua dulce consumida por actividades humanas”. De igual forma, sirve para determinar de manera multidimensional, cuánto es el volumen de agua (directa o indirecta) que tiene un producto a lo largo de su cadena productiva (Hoekstra et al., 2011). Además, permite cuantificar el grado de contaminación presente en el agua residual generada de una actividad productiva determinada (Zárate Torres et al., 2017). Este indicador está conformado por 3 huellas o

componentes que determinan, de manera estratificada y con mejor exactitud, la cantidad de agua o huella virtual utilizada en los procesos, estas son: la huella azul, la huella verde, y la huella gris.

Cada componente evalúa el desempeño de los procesos unitario dentro del sistema de producción. En este sentido, la huella azul, calcula el consumo directo de agua durante las actividades productivas; la verde, el consumo por precipitación en el área de producción de alimentos; y la gris, representa el volumen de agua necesario para la dilución de contaminantes en el agua residual (efluente) que es descargada durante todo el proceso (Mekonnen y Hoekstra, 2012). Los resultados obtenidos facilitan la comprensión en cuanto a la demanda del recurso para el sistema analizado y a la vez permite el desarrollo de propuestas de mejora para la gestión eficiente. De esta manera, define recomendaciones en las alternativas de manejo o tratamientos que minimicen el impacto ambiental en cuanto a calidad y cantidad de agua en cuerpos de agua que posteriormente pueden ser aprovechadas por comunidades aledañas, u otros puntos aguas abajo.

Una de las producciones agropecuarias que ha tenido mayor crecimiento los últimos años en Honduras es la producción porcina, reportando un consumo de carne de cerdo aproximado de 3.5 kg/persona/año (Molina et al., 2014). Según la Asociación Nacional de Porcicultores de Honduras (ANAPOH), el sector productor ha mantenido un crecimiento interanual constante del 11.1% hasta el 2017 (Prensa-SDE, 2019). El agua es un recurso indispensable al mantenimiento de este sector, y su crecimiento implica el incremento en la demanda de este recurso y la generación de aguas residuales con elevadas cargas contaminantes. Por otra parte, las normativas ambientales se han reforzado volviéndose cada vez más exigentes en cuanto a volumen y calidad agua de efluentes procedentes de dichos sectores.

Los cerdos logran absorber únicamente 33% volumen diario de alimento consumido, dejando como remanente la un 67% de generación de excretas (Zepeda Zepeda, 2017). En granjas porcinas se pueden producir hasta 1.35 kilogramos de materia fresca de excretas por cada kilogramo de materia seca ingerida siendo el 70% de esto materia orgánica, la cual representa el contaminante mayoritario

en los efluentes de agua residual (Ruvalcaba-Gómez et al., 2019). La cerdaza y los purines, pueden afectar directamente el aire, suelo y agua por medio de la liberación de componentes químicos; como sulfuro de hidrógeno, amoníaco, dióxido de carbono o metano (Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional [USAID] y Manejo Integrado de Recursos Naturales [MIRA], 2009). Al mismo tiempo, contienen gran cantidad de macro y micronutrientes como el nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio y sodio; y minerales como el hierro, manganeso, cobre y zinc (Segura Peñafiel, 2020).

La Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano cuenta con una planta de ganado porcino de carácter intensivo y altos índices de productividad. La granja fue construida en el año 2006, y maneja aproximadamente una población aproximada de 800-900 animales/mes. Estudios previos señalan que en promedio se utilizan 10 m³ de agua diariamente para las labores de limpieza, y se producen 14,349.87mg/L de DQO en los efluentes de aguas residuales (Zepeda Zepeda, 2017). La mezcla de agua, y purines cargados con gran cantidad de materia orgánica, nitratos, fósforos y potasio, pueden afectar a cuerpos superficiales o mantos freáticos del agua a través de la infiltración por descargas directas sin previo tratamiento provocando impactos negativos, tanto a nivel ambiental, como social para comunidades aledañas a la granja.

Con el pasar de los años, la granja ha añadido diferentes unidades de tratamiento para las aguas residuales generadas durante la limpieza de los purines de los corrales de engorde, gestación, maternidad y destete. Al momento de realizar la investigación, las unidades de tratamiento inician con un separador de sólidos de sólidos (tamizador), un biodigestor, dos lagunas de anaerobias y cuatro sistemas de biofiltros conectados en serie. Estos se han incorporado con el objetivo de reducir la carga orgánica presente en los purines, así como los componentes nitrogenados y fósforo.

La planta porcina no mantiene un monitoreo constante del consumo de agua y únicamente presenta mediciones semestrales de análisis de calidad de agua del efluente final, sin incluir registros históricos sobre el volumen del caudal descargado al cuerpo receptor. Al mismo tiempo, carece de

una infraestructura que permita cuantificar dicho efluente, siendo esta una limitante para encontrar datos más robustos sobre dicho valor para medir la eficiencia del sistema de tratamiento. Esto representa una limitante para la implementación de metas claras asociadas al uso responsable del recurso y en verificar la eficacia en la implementación de medidas preventivas y correctivas. En este sentido, el desarrollo de una línea base en donde se estimen los patrones de consumo y el desempeño de las unidades de tratamiento implementadas para la planta de ganado porcino, facilitará el planteamiento de alternativas para la óptima gestión del recurso y oportunidades de mejora.

El siguiente trabajo tiene el propósito de determinar la demanda hídrica en la planta de producción porcina de Zamorano y la eficiencia de los sistemas de tratamiento implementados para el efluente. En este contexto se plantearon como objetivos, estimar la demanda hídrica de la planta de ganado porcino y su distribución en las actividades operativas de la planta porcina aplicando la metodología de cálculo de la huella hídrica azul. Seguidamente, estimar el impacto generado por descarga del efluente residual a partir del cálculo de la huella gris por jornada de 4 horas operativas, y finalmente, evaluar el desempeño de unidades de tratamiento de agua residual a partir del cálculo de eficiencia de remoción de materia orgánica y sólidos.

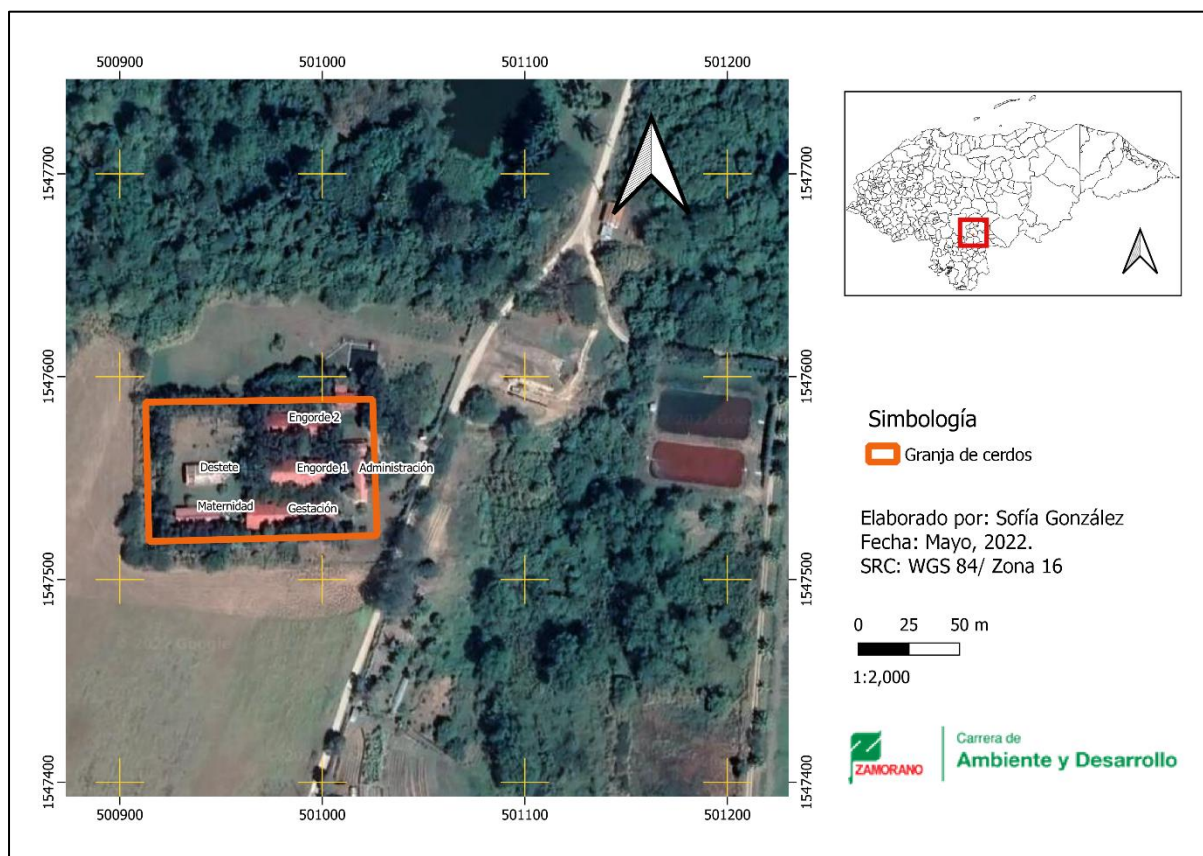
Metodología

Área de Estudio

El estudio se realizó en la planta de cerdos de la Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano ubicada en el Valle del Yeguaré, municipio de San Antonio de Oriente, del departamento de Francisco Morazán, Honduras. Posee un clima tropical seco con temperaturas promedio de 24.5 °C, una precipitación anual promedio de 1100 mm. El cuerpo receptor al que se descarga el efluente es el Río Yeguaré con unas coordenadas de 13°79'54.57" Latitud Norte, 86°59'10".41 Longitud Oeste.

Figura 1

Ubicación de la planta porcina de la Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano.



Alcances de Estudio e Indicadores de Desempeño

Para el análisis de la demanda de agua de la planta de ganado porcino se aplicó la metodología de cálculo de Huella Hídrica según Hoekstra et al. (2011), con enfoque en la evaluación de la huella hídrica azul por jornada reportada en L/kg peso vivo, y la huella hídrica gris del proceso de producción

en m³/jornada. La primera, incluyó la totalidad aproximada de kilogramos de peso vivo de cerdo en todas las etapas fisiológicas, y limitó su alcance a la jornada matutina del trabajo, equivalente a 4 horas. Para este cálculo no se consideró el ciclo de vida del cerdo, sino que se utilizó la metodología como indicador de desempeño para determinar los litros de agua consumidos directamente por la planta en el periodo de tiempo seleccionado.

Por otra parte, se consideró el componente gris vinculado a la cantidad de agua necesaria para diluir los contaminantes presentes en un determinado efluente, y que es reportado como metros cúbicos de agua equivalentes por jornada evaluada en la planta porcina. No se consideró el componente verde ya que, al no aplicar el análisis de ciclo de vida, la trazabilidad del agua indirecta necesaria para realizar las actividades de elaboración de alimentos o medicamentos utilizados por la granja está fuera de los límites de mi investigación. Tampoco se consideró en el componente azul actividades de cosecha de agua para su incorporación en los procesos productivos, ya que la granja no cuenta con infraestructura destinada a esta actividad.

El estudio mantuvo un enfoque exploratorio-descriptivo donde para el primer objetivo se realizó el cálculo de las huellas hídricas previamente descritas durante la jornada matutina de la operación de la planta de ganado porcino que comprende el horario entre 6:30 a 10:30AM. Para la estimación de la demanda se compararon resultados de dos visitas independientes a la granja, conformada por los días: 3 de mayo (muestreo 1) y 27 de mayo (muestreo 2). Al mismo tiempo, se calculó de la huella gris para el segundo objetivo, tomando como principal contaminante la carga de DQO del efluente en el punto oficial de descarga al río Yeguaré ubicado en una salida por el Eco-sendero de la universidad. Se tomaron muestras puntuales de distintos sitios para evaluar los cambios en la dinámica del efluente y su caudal. Cada muestra fue sometida a los análisis de la metodología correspondiente en el Cuadro 1.

Para el tercer objetivo, se evaluó la eficiencia de remoción de materia orgánica a través de la recolección de 21 muestras compuestas en cuanto al efluente crudo y la salida de cada unidad de

tratamiento (tamizador, biodigestor, lagunas anaerobias, filtros y biofiltros) durante los meses de marzo y abril. Dichas muestras fueron sometidas a los mismos de análisis in situ y ex situ de laboratorio aplicados en el Cuadro 1 para conocer las características del efluente en tiempo real de la medición.

Cuadro 1

Metodología para análisis de muestras en campo y laboratorio.

	Parámetro/ unidades	Método	Referencia
	Temperatura (°C)	Multiparámetro de campo	APHA
	pH	Multiparámetro de campo	APHA
In situ	Conductividad (mS/cm)	Multiparámetro de campo	
	Salinidad (ppt)	Multiparámetro de campo	APHA
	Sólidos disueltos totales (ppm)	Multiparámetro de campo	APHA
	Sólidos totales (mg/L)	2540B Método estándar	APHA
Ex situ	Sólidos suspendidos totales (mg/L)	2540D Método estándar	APHA
	Demanda química de oxígeno (mg O ₂ /L)	5220B Método estándar	APHA

Nota. Considerando APHA como el método estándar de análisis de aguas y aguas residuales.

Estimación de la Demanda Hídrica

El sitio de estudio cuenta con un medidor de consumo de agua tipo Woltmann de transmisión magnética de la marca GENEBRE. Fue instalado desde noviembre del 2015, y cumple la función de reportar lecturas en metros cúbicos a través de cuatro marcadores; uno principal y tres de ruedas de precisión. Otro medidor análogo de la universidad y se encuentra ubicado dentro de la cerca perimetral a orilla de la carretera en la entrada de la planta de ganado porcino (N°15.0372).

Para obtener la demanda hídrica mensual y anual de la granja, se utilizaron los datos promedio de los años 2015 a 2021 obtenidos por la unidad de Planta Física de Zamorano. Al mismo tiempo, para determinar los datos de consumo diario se monitorearon los valores del medidor durante los meses de febrero a junio del presente año.

Se estimó y clasificó el consumo de agua en cuatro categorías: ingesta por animales, descritas en el Cuadro 2. Para determinar la existencia de un patrón de consumo, se tabularon los registros de consumo mensual entre los años 2015 y 2021, obtenidos de la base de datos de la Unidad de Planta

Física del campus. El porcentaje de la demanda que cada actividad representa se analizó mediante el programa de Microsoft Excel aplicando estadística descriptiva, incluyendo gráficos para su comparación.

Cuadro 2

Métodos de cuantificación para la demanda hídrica en los procesos en la planta porcina.

Categoría	Actividades	Método de medición
Personal	Uso de baños	Frecuencia de uso y volumen de descarga de los baños.
	Uso de duchas	Caudal de la regadera del baño de caballeros /tiempo de llenado de un balde por diferencia de altura
Limpieza general	Lavado de overoles	Considera dos usos durante la mañana, uso de ficha técnica para demanda de agua.
	Limpieza de vehículos	Caudal de la manguera /tiempo de llenado de un volumen conocido por diferencia de altura.
Limpieza operativa	Lavado de corrales	Diferencia en registros del medidor de la planta en los horarios seleccionados de la jornada.
Ingesta de animales	Demanda metabólica	Demanda hídrica conforme a la cantidad de alimento consumido. Ecuación de Brooks et al. (1984).

Huella Hídrica

Estimación de Pesos de los Animales

Se trabajó con los registros de la población de animales presentes en la granja y sus respectivos pesos conforme a los meses del estudio. Se obtuvo la base de datos en documentos de Excel, proporcionada por la instructora del Aprender Haciendo. Aquí se incluyeron los pesos animales presentes de los edificios de Engorde 1 y Engorde 2, y se clasificaron según la etapa fisiológica como cerdos en crecimiento, cerdos en desarrollo y engorde o finalización. Al mismo tiempo, se hizo un censo de los animales presentes en los demás edificios y se cuantificaron los pesos promedio para reproductores (machos, hembras gestantes y lactantes) conforme a una revisión literaria. Del mismo modo, para el caso de los lechones, lechones destetados y cerdas de reemplazo se utilizaron los registros de peso promedio de parto por camada y pesos de destete de la granja.

Se calcularon los pesos estimados de los cerdos en crecimiento, desarrollo y engorde utilizando la Ganancia de Masa Diaria (GMD) individual correspondiente. Para este cálculo, se consideraron los pesos previos y posteriores a la fecha en que se llevó a cabo el muestreo utilizando la fórmula de la Ecuación 1. Finalmente, se multiplicaron los valores obtenidos de GMD por los días de diferencia entre la última medición real y se le sumó a la primera medición, como se muestra en la Ecuación 2. Con esto, poder determinar el valor del peso vivo expresado en kilogramos para el cálculo de la huella.

Ganancia de peso diaria

$$GMD = \frac{\text{peso final} - \text{peso inicial (kg)}}{\text{fecha final} - \text{fecha inicial (día)}} \quad [1]$$

Donde:

GMD: Ganancia de peso diaria en (kg/día).

Cálculo del peso estimado

$$\text{Peso estimado (kg)} = \text{Peso inicial} + [GMD \times (\text{fecha medición} - \text{fecha inicial})] \quad [2]$$

Demanda Hídrica y Categorías de Uso

Se compararon los resultados obtenidos de la metodología de la huella azul del producto del volumen de agua consumidos durante la jornada matutina en los dos días de muestreo (3 y 27 de mayo). Después de obtener el volumen total de agua, se fraccionó dicho valor conforme a las actividades realizadas en la planta por medio del medidor de agua. Simultáneamente, se dividió el en las categorías descritas en el Cuadro 2, las cuales fueron analizadas de manera descriptiva con promedios y gráficos en el programa de Excel. Aquí se utilizaron las ecuaciones 3 y 4 de Brooks et al. (1984), para obtener la demanda estimada de agua por cada individuo en producción. Finalmente, se calculó el indicador por medio de la Ecuación 5 para la estimación de la huella hídrica para cada día.

Demanda de agua estimada para lechones

$$\text{Agua ingerida (L/día)} = 0.149 + 3.053 \times \text{consumo diario de alimento (kg/día)} \quad [3]$$

Demanda de agua estimada para los cerdos

$$\text{Agua ingerida (L/día)} = 0.788 + (2.23 \times \text{demanda diaria de alimento}) + 0.36 \times \text{Peso}^{0.06} \quad [4]$$

Cálculo de huella hídrica azul

$$HH_{\text{azul}} = \frac{\sum[V_{\text{uso}} + V_{\text{ing}} + V_{\text{limp}} + V_{\text{ope}}]}{\text{kg de peso vivo}} \quad [5]$$

Donde:

HH_{azul} : Huella hídrica azul (L/kg-peso vivo-jornada)

V_{uso} : Volumen de agua utilizada por empleados para higiene personal (L)

V_{ing} : Volumen de ingesta estimado para los animales (L)

V_{limp} : Volumen de lavado de overoles y automóvil (L)

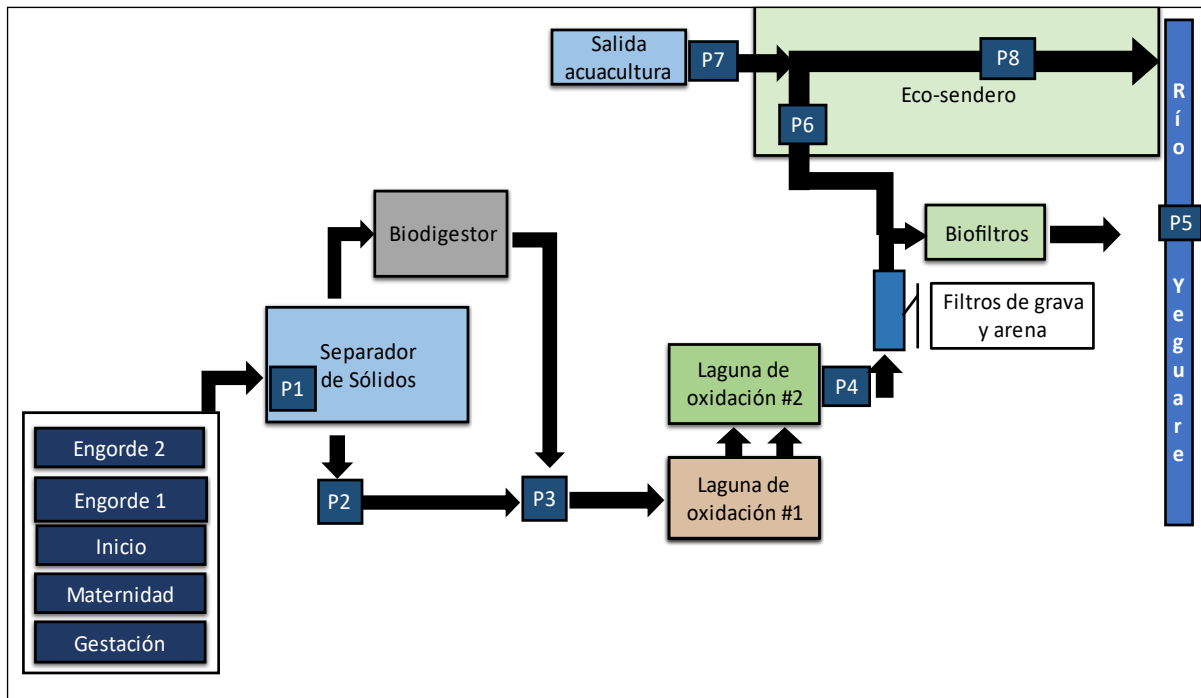
V_{ope} : Volumen de lavado de corrales (L)

Huella Hídrica Gris por Jornada

En el cálculo de este componente se compararon los resultados de los dos tiempos de muestreo previamente determinados, recolectando 8 muestras puntuales tomadas en puntos de salida de las unidades de tratamiento, el canal que conecta con la descarga con el cuerpo receptor, y el río Yeguaré aguas arriba al punto de descarga del efluente final (Figura 2). Para este monitoreo, únicamente se consideró el efluente tratado generado durante la jornada de trabajo en la que se realizó la visita en el último punto antes de la unión con otros efluentes (P6). No se incluyó el punto de salida de los biofiltros, por no conectar con una descarga al cuerpo receptor durante el tiempo de monitoreo.

Figura 2

Diagrama de flujo de la dinámica del efluente dentro y fuera del sistema de tratamiento de la granja porcina.



Nota. Donde: P1: efluente crudo, P2: la entrada al biodigestor, P3: la salida del biodigestor, P4: salida de laguna de oxidación #2, P5: el río Yeguaré, P6: el canal del eco-sendero, P7: el efluente de la laguna de acuicultura, P8: la salida mezclada de ambos efluentes.

Se compararon los resultados de la huella hídrica gris de SST y DQO utilizando para la variable de concentración natural (C_{nat}) el valor de estos parámetros presentes en una muestra tomada aproximadamente 300 m antes del punto de descarga en el Río Yeguaré. De igual manera, se calcularon los caudales aproximados en cada punto de muestreo utilizando los métodos descritos en el Cuadro 3. La huella gris se calculó a partir de la concentración de la DQO presente en el efluente final y el caudal de esta corriente utilizando la Ecuación 6 (Hoekstra et al., 2011):

Cálculo de huella hídrica gris

$$WF_{gris} = \frac{L_{(mg/seg)}}{c_{max} - c_{nat}} \quad [6]$$

Donde:

WF: Huella hídrica gris (L/seg)

L: Carga contaminante (mg/seg)

Cmax: Concentración máxima permitida (mg/L).

Cnat: Concentración que se encuentra en el río (mg/L).

Cuadro 3

Características de las muestras puntuales.

Punto de muestreo	Tipo de muestra	Composición de cada muestra	Estimación de caudal
Entrada fosa	Puntual	1 muestra tomada durante el tiempo inicial de limpieza	Diferencia de altura de un volumen conocido (la fosa).
Entrada al biodigestor	Puntual	1 muestra tomada durante el bombeo de la bomba al biodigestor	Tiempo de llenado de un volumen medido con una probeta.
Salida del biodigestor	Puntual	1 muestra tomada a los 10 minutos de haberse encendido el biodigestor	Tiempo de llenado de un volumen medido con una probeta.
Salida de la laguna #2	Puntual	1 muestra tomada en la tubería de salida de la laguna #2	Tiempo de llenado de un volumen medido con una probeta.
Canal de Eco-sendero	Puntual	1 muestra tomada en la ruta del Eco-sendero en el vertedero triangular	Ecuación de vertedero triangular
Salida laguna de acuicultura	Puntual	1 muestra tomada en una tubería de aliviadero de la laguna	Estimación por forma indirecta (balance de materia). Pues este presentó distintos puntos de salida.
Mezcla con acuicultura	Puntual	1 muestra tomada aproximadamente 30 m después de la mezcla de ambas rutas.	Método de flotador
Río Yeguaré	Puntual	1 muestra tomada a mitad de la mañana en el punto 300 m arriba de la descarga del efluente de la laguna de acuicultura mezclado.	No se determinó el caudal en este punto por ausencia de equipo de medición.

Eficiencia en Remoción de Sólidos y Materia Orgánica

Descripción de Unidades de Tratamiento

Fosa de Captación.

Cumple la función de acumular los efluentes generados de los cinco edificios de la unidad (maternidad, gestación, destete, engorde 1 y engorde 2) para su posterior bombeo y filtrado. Sus dimensiones son de 2.04 x 2.04 x 3 metros como se observan en el Anexo A y cuenta con un volumen a capacidad de diseño de 12 m³, del cual solo se puede almacenar aproximadamente 10 m³ del volumen líquido. El diseño incluye en su entrada una tubería de ocho pulgadas de diámetro ubicada a los primeros 0.84 m partiendo desde la superficie; y con una salida tipo aliviadero a los primeros 0.51 m – esta es una tubería que se ubica en uno de los laterales de la fosa y conecta con una caja de registro que posteriormente conduce el efluente hacia las lagunas una vez el líquido alcanza esa altura.

Tamiz Gravitacional.

El tamiz gravitacional, ilustrado en el Anexo B, es la unidad de pretratamiento que cumple con la función de separar las partículas de sólidos gruesos mediante un proceso de filtrado. El efluente se bombea en forma continua por una bomba de 5 hp por periodos de 1 a 2 horas por jornada de limpieza. El efluente es enviado a una superficie de malla inclinada donde el líquido se escurre por gravedad separando la cerdaza de la fracción disuelta.

Biodigestor.

La función principal de esta unidad de tratamiento es disminuir la carga orgánica del efluente, desdoblar compuestos nutricionales de mayor complejidad (como las proteínas) y reducir los malos olores generados como resultados de estos procesos. Posee un dimensionamiento para volumen líquido de aproximadamente 100 m³ (visualizado en el Anexo C), para el cual recibe una alimentación teórica diaria de 2 a 3 m³ del efluente filtrado durante los primeros 10 a 20 minutos del tiempo de limpieza. Esto debido a que sus dimensiones no permiten el tratamiento de la totalidad del efluente filtrado, por lo que la mayor parte este pasa directo a las lagunas. Dicha operación depende mucho

del manejo que los empleados le den durante las jornadas de limpieza, ya que ellos son los que controlan tiempo de bombeo del efluente cuando el tamizador se encuentre encendido.

Lagunas.

El sistema cuenta con dos lagunas anaerobias conectadas en paralelo (anexos D y E), las cuales mantienen una profundidad aproximada de 1.2 metros y un área superficial de 40 x 20 metros. La laguna #2 fue diseñada de carácter facultativo cuando se construyó la granja en el año 2006, pero sus dimensiones en comparación con la gran carga de contaminantes no llegaban a cumplir con un tratamiento efectivo del efluente. En el año 2019, se le hizo la última limpieza de lodos por mantenimiento y ese mismo año empezó a funcionar una laguna paralela con las mismas dimensiones (Laguna #1). Esta última recibe todo el efluente diario proveniente del biodigestor, el rebalse de la fosa de captación y salida del tamizador. Semanalmente, se le añade una mezcla de 2 kg de bacterias anaerobias surfactantes de la marca Hydra[®] para tratamiento de efluente una vez ingresa a la laguna #1 con el objetivo de acelerar los procesos de degradación de la materia orgánica hasta que este pase a la laguna #2.

Filtros y Biofiltros.

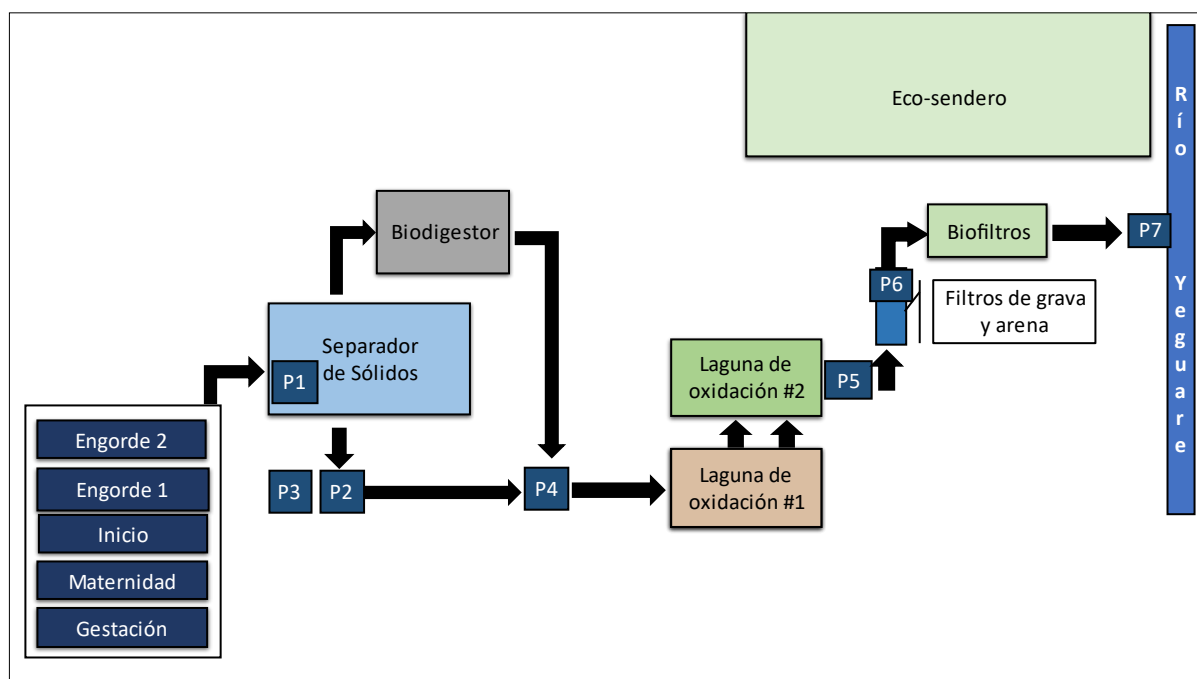
Una vez efluente sale de la laguna #2 ingresa a dos unidades de filtrado, la primera compuesta por tres filtros de flujo ascendente de grava y arena conectados en serie (Anexo F); y el segundo consiste en cuatro biofiltros conectados a favor de la pendiente con cultivos de *Vetiveria zizanioides* (valeriana) y *Heliconias sp.* (Anexo G). Los filtros de grava y arena están diseñados en barriles de 55 galones conectados por tuberías de 4 pulgadas y tienen la función de remover sólidos suspendidos totales. Por otro lado, en para el caso de los sistemas de biofiltros, estos se encuentran en estructuras de ladrillo recubiertas por una geomembrana y una capa de grava, carbón, trozos de madera y arena respectivamente. Estos últimos cumplen la función de remoción de nutrientes mayormente nitrógeno y fósforo.

Toma de Muestras

Para el análisis de eficiencia en remoción de materia orgánica y sólidos se utilizaron muestras independientes a las tomadas para el cálculo de la huella gris. Los puntos de muestreo como se visualizan en la Figura 3, incluyendo la entrada del efluente crudo, el rebalse de la fosa de captación, la entrada al biodigestor, la salida del biodigestor, la salida de la laguna #2, la salida de los filtros de arena y la salida de los biofiltros. Para el análisis de cada punto se trabajó con el promedio de 3 muestras compuestas tomadas de forma independiente durante marzo y abril, conforme se observa en el Cuadro 4. Cada muestra compuesta estuvo integrada por tres muestras individuales (muestras puntuales) tomadas por intervalos de tiempo definidos por el estudio. Se registraron características fisicoquímicas in situ con un multiparámetro de campo marca OAKTON® y los ensayos se verificaron en la muestra compuesta luego de ingresar al laboratorio. Se estimó el caudal para cada muestra conforme a lo descrito en el Cuadro 4.

Figura 3

Diagrama de flujo para los puntos de muestreo dentro del sistema de tratamiento de aguas residuales de la granja de cerdos.



Cuadro 4*Características de las muestras compuestas.*

Punto de muestreo	Tipo de muestra	Composición de cada muestra	Estimación de caudal
Entrada fosa	Compuesta	3 muestras individuales en intervalos de 20 minutos, al haber iniciado el lavado de los corrales.	Diferencia de altura de un volumen conocido (la fosa).
Rebalse de fosa	Compuesta	3 muestras individuales en intervalos de 10 minutos cuando empezó a salir.	Diferencia de altura de volumen conocido (la fosa).
Entrada al biodigestor	Compuesta	3 muestras individuales en intervalos de 10 minutos a los 5 minutos de haberse encendido el separador de sólidos.	Tiempo de llenado de un volumen medido con una probeta.
Salida del biodigestor	Compuesta	3 muestras individuales en intervalos de 15 minutos.	Tiempo de llenado de un volumen medido con una probeta.
Salida de la laguna #2	Compuesta	3 muestras individuales en intervalos de 1 hora.	Tiempo de llenado de un volumen medido con una probeta.

Para la preparación de las muestras compuestas en el caso de los puntos de entrada a la fosa y salida del separador de sólidos se utilizó la Ecuación 7, y para el caso de las demás muestras se realizó una mezcla completa de las 3 muestras puntuales dado que sus caudales no variaron conforme al muestreo, y el efluente era más homogéneo.

Cálculo del volumen de alícuotas para muestras compuestas

$$V_i = \frac{V \times Q_i}{n \times Q_p} \quad [7]$$

Donde:

V_i : es el volumen de alícuota (mL)

Q_i : Q es el caudal de la muestra (L/s)

V : es el volumen total (mL)

N : es el número de muestras

Posteriormente, cada muestra fue evaluada con los parámetros del Cuadro 1, con la diferencia que a este se le incluyó el análisis de sólidos sedimentables con el propósito de evaluar descriptivamente el efluente, y no se consideró el análisis de la demanda química de oxígeno (DQO) para el punto de salida del efluente proveniente del filtro de grava y arena. En general, el desarrollo del tercer objetivo contó con un total de 21 muestras para ST y SST, y 18 muestras para el análisis de DQO. Finalmente, para el cálculo de la eficiencia se utilizó la Ecuación 8. Se compararon las concentraciones de entrada y salidas de cada unidad de pretratamiento y tratamiento a través de estadística descriptiva y graficando sus tendencias en las etapas del tratamiento. También se evaluó su desempeño mediante revisión literaria.

Remoción en materia orgánica y sólidos

$$Eficiencia\ en\ remoción = \frac{C_i - C_f}{C_i} \times 100\% \quad [8]$$

Donde:

C_i: Concentración inicial (mg/L)

C_f: Concentración final (mg/L)

Resultados y Discusión

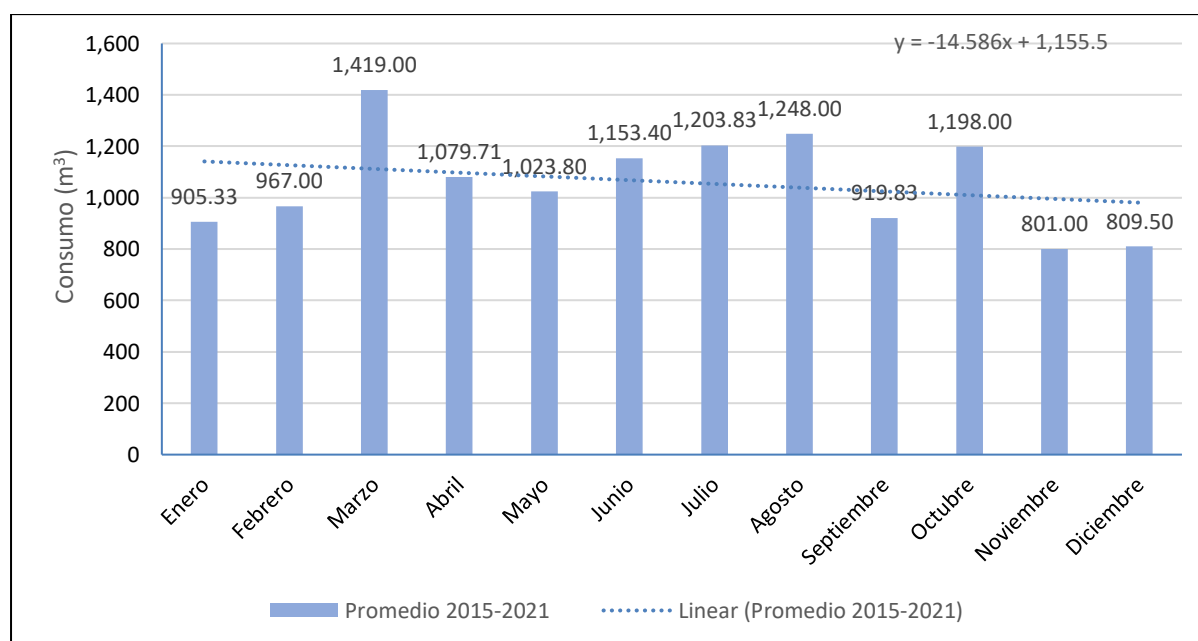
Demanda Hídrica

Registros de Consumo

Durante los años del 2015 al 2021, el caudalímetro de la planta de ganado porcino registró un consumo promedio anual de 12,893 m³ con una demanda mensual promedio de 1,061m³, reportando valores máximos de 1,479 m³ y mínimos de 801 m³. Al mismo tiempo, en el estudio se identificó que los meses de marzo y agosto fueron los que reportaron una mayor tendencia de consumo de agua en la planta porcina conforme se aprecia en la Figura 4. Se infiere una de las causas por incremento en el consumo de agua ingerida por parte de los animales causado por el aumento en la temperatura para estos meses. Según Meunier-Salaün et al. (2017), los cerdos pueden aumentar el consumo de agua en 0.1 litros de agua por día conforme la temperatura aumente 1 °C mayor al rango de 6 a 32 °C. Los resultados se encuentran respaldados con los registros obtenidos de la plataforma Weather Davis, donde durante estos meses se registraron temperaturas máximas promedio de 34 a 37 °C registrados por el pluviómetro de EAP-Zorrales.

Figura 4

Consumo mensual promedio de agua durante los años 2015 al 2021.



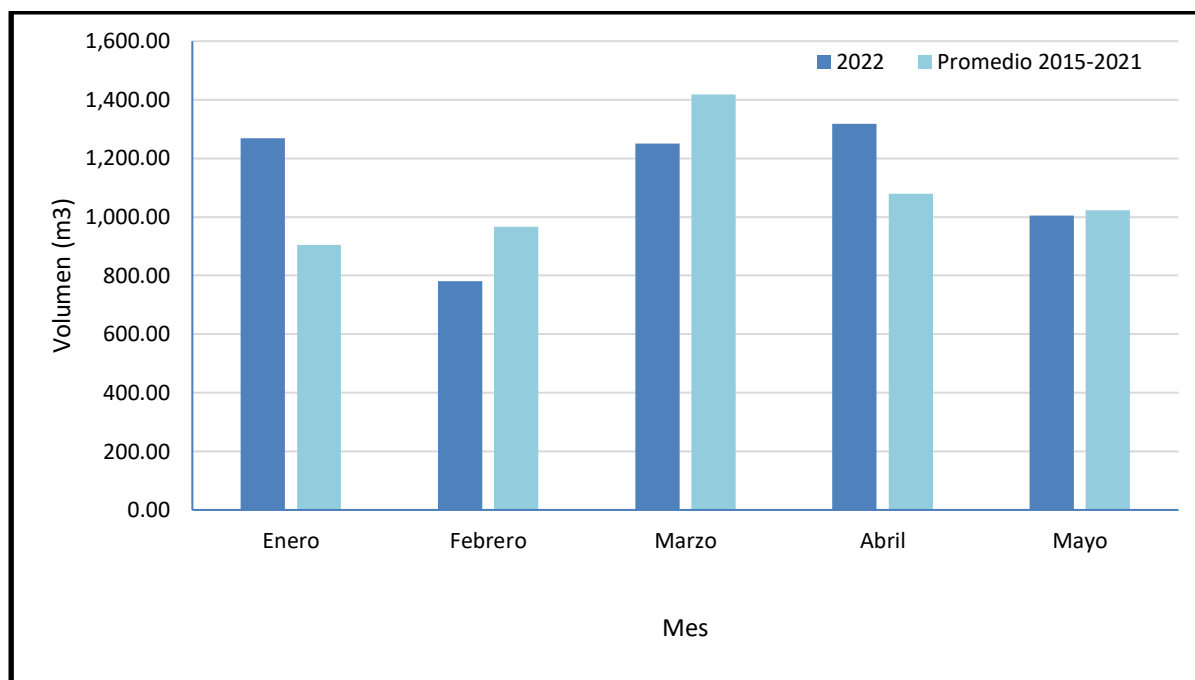
Por otro lado, la comparación que se realizó para los registros obtenidos durante los primeros 5 meses del presente año demostró valores del consumo de agua promedio diarios de 35.20 m³ con variaciones asociadas a la actividad de estudiantes que estuvieron presentes en la planta por parte del Aprender Haciendo. Como se observa en los Anexos H e I, la presencia de estudiantes, a pesar de no tener un consumo homogéneo en durante los protocolos de limpieza, vuelve eficiente la demanda de agua de la planta en comparación a la demanda de la planta cuando esta únicamente cuenta con los operarios permanentes.

En este sentido, en la Figura 5 se registró un consumo de agua por debajo del promedio para los meses de febrero, marzo y mayo al compararse con los registros promedio correspondientes al periodo 2015-2021. Se infiere que esto se debió a que a partir del año 2021 la planta implementó la actividad de recolección en seco del estiércol en los corrales en de los edificios previamente al lavado con manguera. Dicha práctica no solo ha favorecido en la disminución el consumo de agua requerida para limpieza de corrales, sino que ha contribuido en reducir la carga orgánica del efluente que cae a la fosa. Puesto que, la gestión del estiércol en efluentes porcinos contribuye en un 59.7 y 78.6% del impacto total para el agua dulce (Edivan Cherubini et al., 2015).

Además, se observó un aumento en el consumo de agua para los meses de enero y abril. En este caso, se infiere que esto ocurrió principalmente a que durante estos meses los estudiantes tuvieron sus periodos vacacionales más extendidos de lo usual (por protocolo de pandemia), lo que representó una ausencia del personal de limpieza en la granja. Consecuentemente, la limpieza de los edificios estuvo a cargo de únicamente los cuatro empleados permanentes, que, por razones de tiempo, no realizaron la limpieza en seco para el lavado de los corrales de los edificios de engorde. En lugar de eso, aparte de utilizar mangueras durante el lavado, mantuvieron abierto el sistema de goteo para charcas en el edificio de Engorde 1, como se muestra en el Anexo J, contribuyendo al aumento en la demanda de agua para limpieza durante estas fechas.

Figura 5

Comparación de consumo de agua de los meses en que se llevó el estudio 2022 con el promedio mensual de los años 2015 a 2021.



Mediante estas comparaciones se determinó que el consumo de agua de la planta porcina es irregular y variable. Al mismo tiempo, depende mucho del ambiente, el estado fisiológico de los animales, los tiempos de limpieza, la presencia de estudiantes, y las actividades de Aprender Haciendo. Este resultado concuerda con lo descrito por Misra et al. (2020), sobre cómo la eficacia de la limpieza en la producción depende de los factores del círculo de Sinner con respecto a los factores mecánicos y de tiempo de limpieza en una granja.

Huella Hídrica Azul

Volumen de Agua por Ingesta.

Los cerdos están compuestos en un 80% de su peso en agua al nacer, y al llegar a la edad de finalizado su composición disminuye hasta en un 50%. El volumen de agua bebida por los animales durante la jornada se calculó por medio del censo de animales y el uso de la ecuación de Brooks et al. (1984) para cerdos adultos y en etapa de destete. Con estos se obtuvo una demanda por ingesta

aproximada de 1,574.46 litros de agua por el total de individuos por jornada durante el muestreo 1 (Cuadro 5) y de 1,484.91 litros para el muestreo 2 (Cuadro 6). Dichos resultados son congruentes con valores aproximados al volumen del agua ingerida en una relación de 3 litros de agua por cada kilogramo de alimento suministrado (Menegat et al., 2019). Para el caso de las cerdas lactantes, los resultados se acercan con los obtenidos por Di Rienzo y Fogolin (2017), puesto que determinaron que la demanda promedio de una cerda lactante es de 15 litros diarios, pero difieren con Babot et al. (2020) y Boulanger (2011) quienes determinan que una cerda lactante debe ingerir un rango medio de 25.9 litros de agua diarios o en un caso extremo hasta 27 litros por día (Gill, 1989).

Cuadro 5

Demanda hídrica por ingesta por individuos en la granja al para el muestreo 1 (3 de mayo del 2022).

Estado fisiológico	Animales	Demanda de alimento (kg/día)	Demanda por ingesta por individuo (L/día-animal)	Ingesta estimada por total de individuos por día (L/día)	Ingesta por jornada (L/jornada)
Machos reproductores	9	2	5.74	51.63	17.04
Hembras reproductoras	61	2	5.74	350.37	115.62
Lactantes	20	4	10.21	204.11	67.36
Lechones	180	0.3	1.06	191.68	63.26
Destete	182	0.8	3.02	549.47	181.32
Crecimiento	168	2.2	6.15	1,033.50	341.06
Desarrollo	198	2.2	6.16	1,220.19	402.66
Engorde	129	3.5	9.07	1,170.14	386.15
Total	947			4,771.09	1,574.46

Cuadro 6

Demanda hídrica por ingesta de alimento para la población de la granja el muestreo 2 (27 de mayo del 2022).

Estado fisiológico	Animales	Demanda de alimento (kg/día)	Demanda por ingesta por individuo (L/día-animal)	Ingesta estimada por total de individuos (L/día)	Ingesta por jornada (L/jornada)
Machos reproductores	9	2	5.74	51.63	17.04
Hembras reproductoras	63	2	5.74	361.85	119.41
Lactantes	108	4	10.21	122.47	40.41

Estado fisiológico	Animales	Demanda de alimento (kg/día)	Demanda por ingesta por individuo (L/día-animal)	Ingesta estimada por total de individuos (L/día)	Ingesta por jornada (L/jornada)
Lechones	282	0.3	1.06	115.01	37.95
Destete	126	0.8	3.02	851.37	280.95
Crecimiento	208	2.2	6.15	775.18	255.81
Desarrollo	96	2.2	6.17	1,282.61	423.26
Engorde	12	3.5	9.07	870.78	287.36
Reemplazo	9	2.0	5.74	68.83	22.71
Total	904			4,430.90	1,484.91

En este sentido, los resultados por ingesta registrados en el muestreo 2 se diferenciaron conforme a la fecha anterior puesto que hubo un cambio en la población presente de los individuos, como se observó en el Cuadro 6. Para el muestreo 1, la población de los animales en estado de desarrollo y engorde fue mayor, a diferencia del muestreo 2 donde solo se contó con la mayoría de la población en etapa juvenil. El motivo, ocurre porque los cerdos al recibir una alimentación restringida, por instinto, incrementan su nivel de ingesta de agua, en más volumen que frecuencia (Almond, 1995; Zdzislaw Mroz et al., 1995). Al mismo tiempo, se observó que hubo un cambio en la población de cerdas lactantes, individuos que por su estado fisiológico son los que demandan mayor cantidad de agua necesitan para cumplir con los requerimientos metabólicos de la lactancia (Boulanger, 2011; Gill, 1989; Torres Vera, 2016).

Demanda Hídrica por Operaciones en la Planta de Ganado Porcino

Para identificar los procesos que incrementan la demanda hídrica dentro de la planta, se realizaron mediciones de caudal por llenado de un volumen conocido de los distintos puntos de salida de mangueras, regaderas y baños utilizaras durante la actividad rutinaria de la granja. Se fraccionó el volumen total registrado durante los dos días de muestreo seleccionados, y se clasificó el volumen de agua demandada con conforme al tiempo de uso.

Durante el monitoreo del muestreo 1, se registró un consumo de 11,159 litros en toda la jornada matutina debido a que se realizaron actividades de limpieza del edificio de gestación y el lavado de los corrales del edificio de engorde 1. Conforme se muestra en el Cuadro 7, la limpieza

operativa por la actividad de lavado de los corrales representó el mayor porcentaje de fracción de agua utilizada por la planta, con un valor de 8,333.03 litros, siendo el 74.7% de la fracción total. En menor escala, se encontró que la limpieza general representó un 6.6%, demanda por ingesta de animales un 14.1% y uso del personal en un 4.6% como se observa en la Figura 6.

Cuadro 7

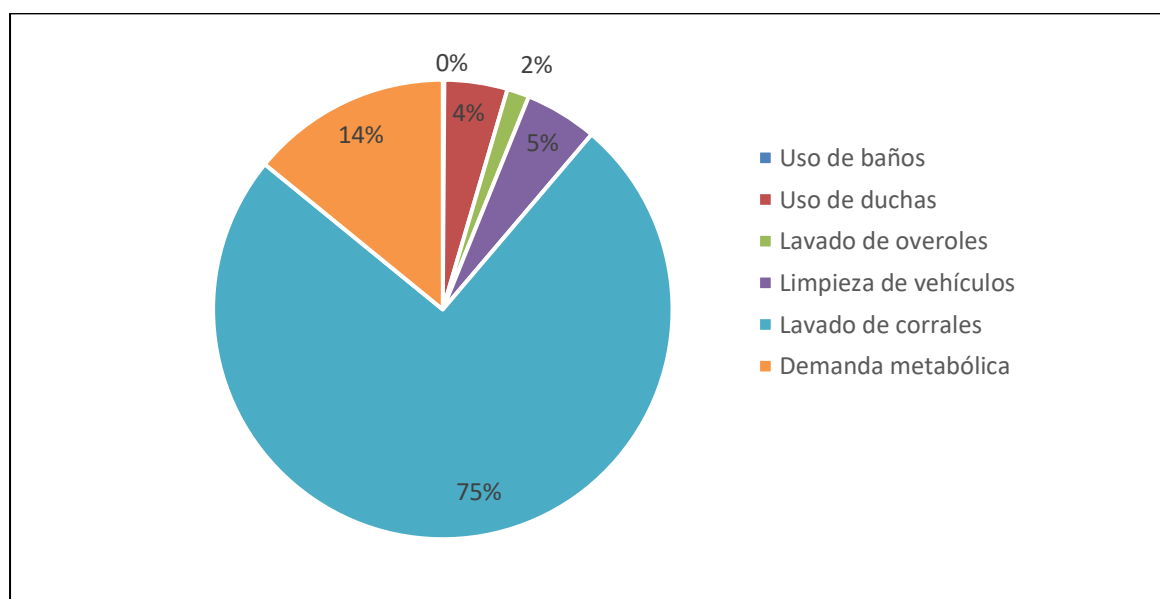
Clasificación de consumo de agua en la granja porcina para el muestreo 1 (3 de mayo).

Categoría	Actividades	Volumen (L/jornada)	Fracción por jornada (L/jornada)
Personal	Uso de baños	12	0.11%
	Uso de duchas	496.00	4.44%
Limpieza general	Lavado de overoles	152.00	1.56%
	Limpieza de vehículos	569.51	5.10%
Limpieza operativa	Lavado de corrales	8,333.03	74.68%
Ingesta de animales	Demanda metabólica	1,574.46	14.11%
Total		11,159.00	100.00%

Nota. Se considera que ingesta de agua diaria de los cerdos abarcan un umbral de 12 horas (5:00-11:00AM y de 3:00-9:00PM), según Brumm (2006).

Figura 6

Gráfico para la fracción de agua consumida durante la jornada matutina del muestreo 1 (3 de mayo del 2022).



Por otro lado, el monitoreo realizado el muestreo 2 mostró un incremento de la demanda reportando el consumo de 14,631 L/jornada, representado en el Cuadro 8. En este caso, el resultado reportado difiere con la fecha anterior por la variación que existe entre el lavado de los distintos edificios, y la disminución que hubo en cuanto a la demanda por ingesta de los animales. La limpieza durante esta jornada incluyó el lavado de la sección de maternidad, el edificio de destete y el Engorde 2 lo cual propició un mayor consumo de agua para esta categoría, con casi un 80% de la demanda total como se visualiza en la Figura 7.

Cuadro 8

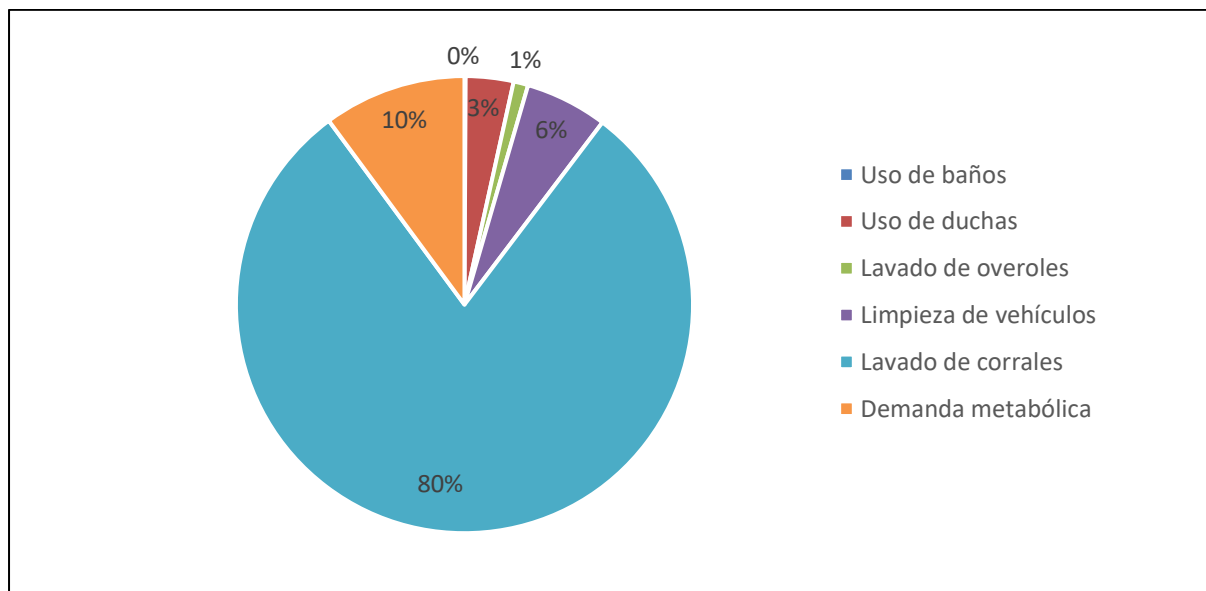
Fracción de agua consumida en la jornada matutina del muestreo 2 (27 de mayo del 2022).

Categoría	Actividades	Volumen (l/jornada)	Fracción por jornada (l/jornada)
Personal	Uso de baños	12.00	0.08%
	Uso de duchas	496.00	3.38%
Limpieza general	Lavado de overoles	152.00	1.04%
	Limpieza de vehículos	854.27	5.82%
Limpieza operativa	Lavado de corrales	11,678.82	79.57%
Ingesta de animales	Demanda metabólica	1,484.91	10.12%
Total		14,678.00	100.00%

Nota. Se considera que ingesta de agua diaria de los cerdos abarcan un umbral de 12 horas (5:00-11:00AM y de 3:00-9:00PM), según Brumm (2006).

Figura 7

Gráfico de la fracción de agua consumida durante la jornada matutina del muestreo 2 (27 de mayo del 2022).



En este contexto, se determinó que el mayor volumen de la demanda hídrica corresponde a las actividades de limpieza. Lo anterior defiere a lo descrito por Muhlbauer et al. (2011) y Misra et al. (2020) donde el valor por limpieza representa únicamente el 5% del agua en la producción por cerdo, y la demanda por los animales representa el 87%, pero esto bajo la consideración de un análisis de ciclo de vida en la producción porcina.

Población de animales y cálculo de unidad funcional.

De acuerdo con estudios anteriores, la planta de ganado porcino mantiene una población promedio de 850 cerdos (Armas Chuquimarca, 2016). Estos se encuentran clasificados según su función y edad fisiológica entre: reproductores (machos, reemplazos y gestantes), cerdas lactantes, lechones recién nacidos, lechones destetados, cerdos en crecimiento, cerdos en desarrollo y cerdos en engorde. Gracias al manejo que se tiene en la parte operativa de la planta, la población de animales se ha mantenido constante conforme a la densidad proyectada de la infraestructura.

En los cuadros 9 y 10 se observan la población de los individuos de la planta conforme a sus etapas de crecimiento y ubicación. Se observó una disminución en la población de animales para el muestreo 2, debido a que semanalmente la planta manda a rastro alrededor de 30 animales en etapa de engorde que cumplieron con su ciclo. Sin embargo, a pesar de haber una reducción en población, se encontró un aumento en el peso total de la población, asociada a un aumento de los cerdos en etapa de destete y crecimiento.

Cuadro 9

Cálculos de los pesos aproximados del total de animales para el muestreo 1 (3 de mayo del 2022).

Estado fisiológico	Animales	Pesos promedio (kg)	Peso total (kg)
Machos reproductores	9	120.0	1,080.0
Hembras reproductoras	61	150.0	9,150.0
Lactantes	20	159.0	3,180.0
Lechones	180	2.93	527.4
Destete	182	26.8	4,877.6
Crecimiento	168	39.8	6,687.6
Desarrollo	198	58.7	11,618.5
Engorde	129	81.3	10,492.6
Total	947		47,613.68

Cuadro 10

Cálculo de los pesos aproximados del total de animales para el muestreo 2 (27 de mayo del 2022).

Estado fisiológico	Animales	Pesos promedio (kg)	Peso total (kg)
Machos reproductores	9	120	1,080
Hembras reproductoras	63	150	9,450
Lactantes	12	159	1,908
Lechones	108	2.93	316.44
Destete	282	26.8	7,557.6
Crecimiento	126	40.47	5,099.43
Desarrollo	208	67.18	13,949.33
Engorde	96	80.63	8,209.10
Reemplazo	12	113.38	1,360.50
Total	904		48,930.39

Con la sumatoria resultante de kilogramos de peso vivo se utilizó para el cálculo de la unidad funcional requerida para la estimación de huella azul a partir de la demanda de agua registrada durante los días en que se tomaron las muestras. En este contexto, se registraron aproximadamente 47,613.68 kg de peso vivo se registraron para el muestreo 1, y 48,930.39 kg de peso vivo para el muestreo 2.

Demanda Hídrica por Unidad Funcional

La demanda hídrica de los kilogramos de peso vivo presente en la granja tomada para el 3 de mayo recibió un valor de 0.23 l/kg-jornada comparado con el de 0.29 l/kg-jornada para el día 27 de mayo. A pesar de contar con menos animales, el incremento de este valor se vincula a la inclusión de mayor número de edificios en las actividades de limpieza, particularmente en el área de maternidad. Esto es congruente con la guía metodológica para huella hídrica (Hoekstra et al., 2011), que describe que al incrementar el número de actividades en un proceso mayor será la utilización del recurso. De igual manera, como la comparación esta únicamente vinculada con la producción en una granja y no incluir el componente verde (indicador con mayor aporte), el valor es mucho menor al obtenido por Di Rienzo y Fogolin (2017).

Huella Hídrica Gris por Jornada

Concentraciones del Efluente

El Cuadro 11 describe las variaciones en el caudal y la concentración de materia orgánica y sólidos presentes en el efluente a través de distintos puntos del monitoreo sólidos suspendidos totales y DQO para la fecha de medición correspondientes al estudio. Al momento de realizar el muestreo se encontró un punto de descarga que funciona como aliviadero ubicado en la antigua tubería de entrada de la laguna #2, el cual se identificó como "Rebalse laguna #2" y se observa en el Anexo K.

Este punto presenta un caudal intermitente, el cual depende mucho del aporte por precipitación y la temporada del año, puesto que durante los primeros meses (enero, febrero, marzo y abril) no se observaron salidas en este punto. Sin embargo, durante el mes de mayo cuando se

realizaron los dos muestreos, sí se registraron salidas en este punto las cuales fueron causadas por eventos de precipitación días previos. Al mismo tiempo se observó que dicha salida se anega en la parte lateral de la laguna y se distribuye conforme a la pendiente para su posterior unión con la ruta trazada por el canal del Eco-sendero, como se describe en el Anexo L.

En la Figura 8, se observa una disminución gradual en las cargas orgánicas y el incremento del caudal en la salida debido a un aporte de la unidad de acuicultura. Durante este día, los resultados obtenidos cumplieron con los parámetros de la norma técnica de la descarga de aguas residuales a cuerpos receptores de la Secretaría de la Salud de Honduras, con un valor menor a 100 mg/L para los sólidos suspendidos totales, y menor a 200 mg/L para la demanda química de oxígeno, esto principalmente a la dilución final con el efluente de acuicultura. Sin embargo, al ser procesos independientes por el tipo de producción manejado no se consideró este punto para el análisis de la huella hídrica. Por lo tanto, se trabajó con las concentraciones y caudal correspondiente del punto en el Eco-sendero donde el efluente se encontró previamente a la unión con la salida de la laguna de acuicultura.

Cuadro 11

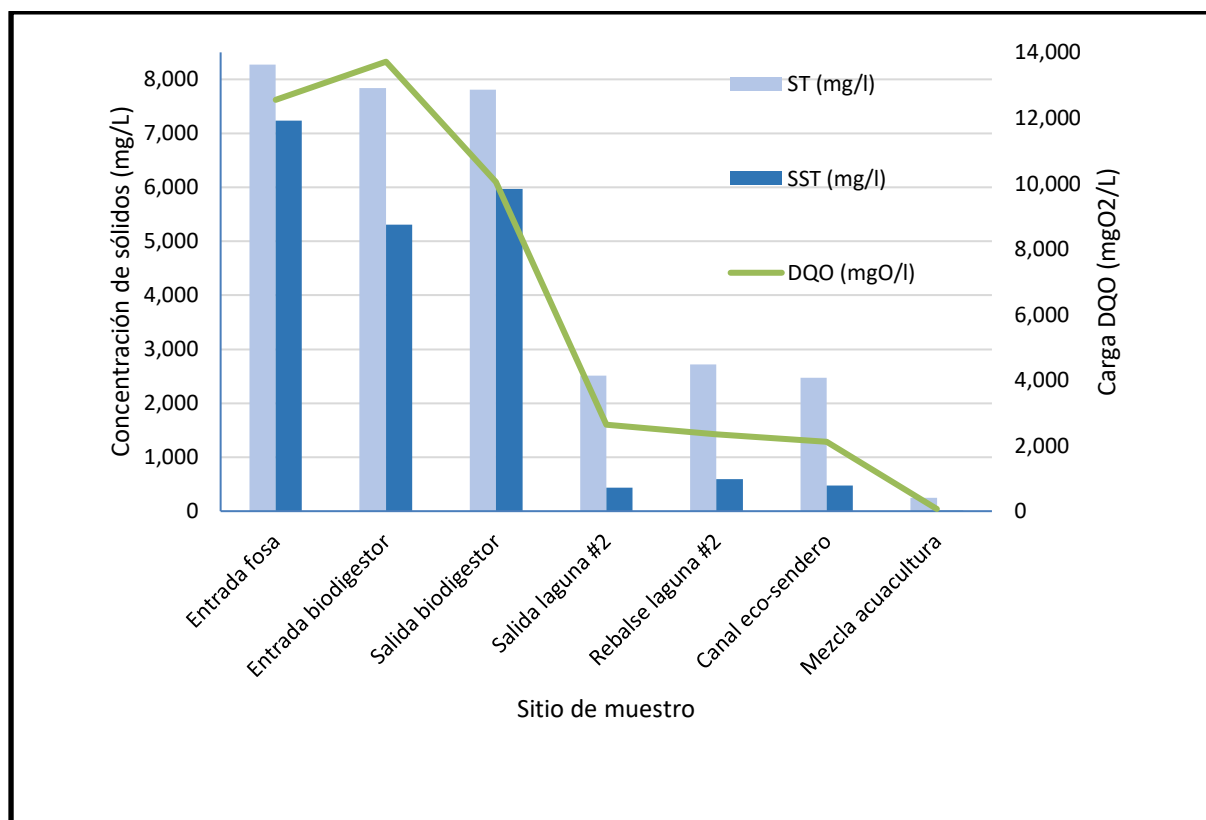
Resultados de los sólidos totales, sólidos suspendidos totales y DQO presentes en el efluente durante el muestreo 1 (3 de mayo del 2022).

Sitio	Caudal (L/seg)	ST (mg/L)	SST (mg/L)	DQO (mgO ₂ /L)
Entrada fosa	1.13	8,268.9	7239.9	12,545.0
Entrada biodigestor	3.88	7,834.4	5309.5	13,715.0
Salida biodigestor	0.08	7,808.9	5972.2	10,045.0
Salida laguna #2	2.72	2,508.9	434.3	2,633.0
Rebalse de la laguna #2	0.05	2,717.0	596.0	2,352.0
Canal de eco-sendero	0.27	2,475.6	476.2	2,121.0
Salida Acuicultura	0.80	196.7	24.0	64.3
Mezcla acuicultura	9.28	250.0	2.7	66.7
Río Yeguaré		362	60	43

Nota. Los parámetros de los muestreos in situ se encuentran descritos en el Anexo M.

Figura 8

Representación gráfica del contenido de sólidos totales, sólidos suspendidos totales y DQO en el efluente durante el muestreo 1 (3 de mayo del 2022).



En el Cuadro 12 los resultados del análisis de los puntos del efluente crudo y la dinámica del efluente a través de las unidades de tratamiento presentaron una reducción efectiva en las concentraciones de los tres contaminantes evaluados (ST, SST, y DQO) para muestreo 2. Del mismo modo se registró un incremento en los caudales provenientes de la salida de la laguna #2 de la planta porcina, la laguna de acuicultura y el efluente final mezclado, esto en respuesta a los eventos de precipitación en días previos al muestreo. En respuesta al aumento de dicho volumen también propició a un aumento de carga de contaminante en el efluente final principalmente por suspensión de las partículas, como se observa en la Figura 9.

Cuadro 12

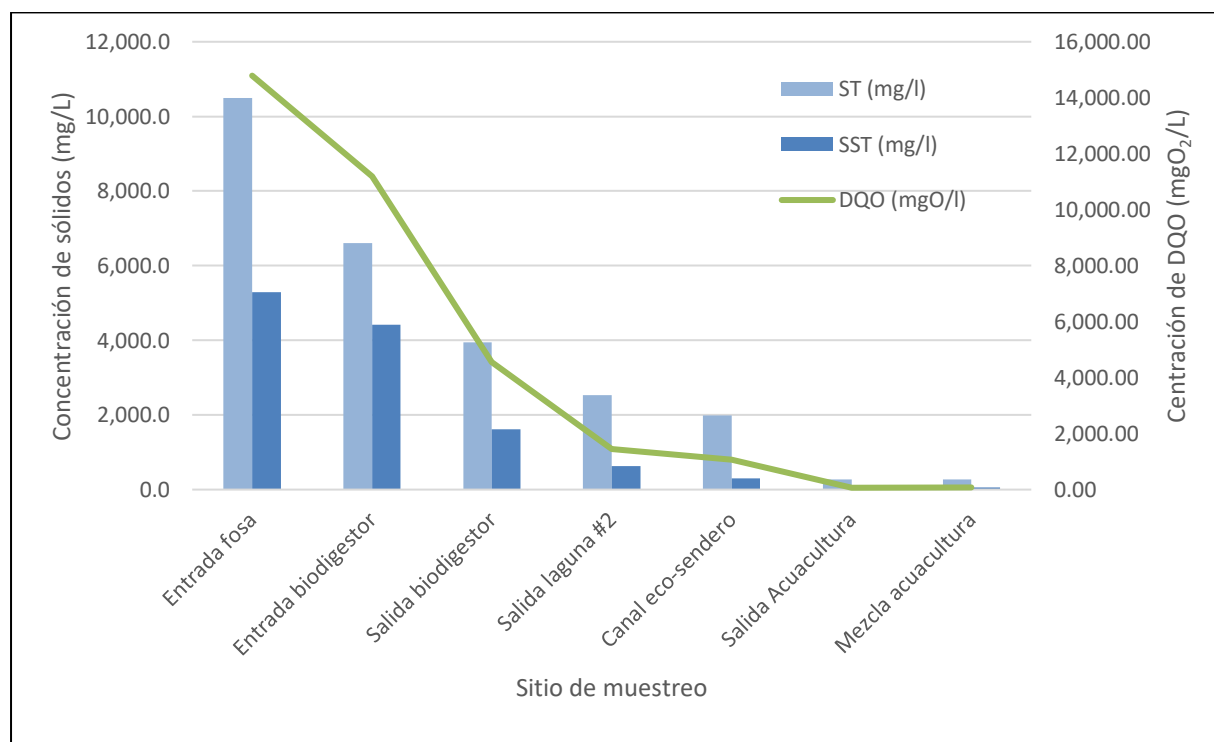
Resultados del análisis de sólidos totales, sólidos suspendidos totales y DQO en distintos puntos del efluente durante la jornada matutina durante el muestreo 1 (27 de mayo del 2022).

Sito de muestreo	Caudal (L/s)	ST (mg/L)	SST (mg/L)	DQO (mgO ₂ /L)
Entrada fosa de acopio	0.69	10,488.89	5,283.33	14,790.00
Entrada biodigestor	5.13	6,603.33	4,419.44	11,190.00
Salida biodigestor	1.54	3,948.89	1,611.11	4,565.00
Salida laguna #2	5.17	2,531.11	625.00	1,458.00
Rebalse de la laguna #2	0.12	2,194.44	474.81	1,510.00
Canal eco-sendero	0.17	1,987.78	297.41	1,063.00
Salida Acuicultura	54.08	273.33	42.50	66.40
Mezcla acuicultura	50.69	273.33	50.48	74.40
Río Yeguaré		313.33	36.67	26.90

Nota: Los parámetros de los muestreos in situ se encuentran descritos en el Anexo N.

Figura 9

Representación gráfica del análisis de sólidos totales, sólidos suspendidos totales, y DQO durante la jornada matutina durante el muestreo 2 (27 de mayo del 2022).



Los resultados en el efluente crudo son congruentes con los obtenidos por Di Rienzo y Fogolin (2017), cuyas concentraciones reportadas en cuanto a la Demanda Química de Oxígeno (DQO) oscilaron entre 2,806 a 44,576 mgO₂/L para el efluente crudo pretratado. Por otro lado, en ambas fechas de muestreo no se consideró la fracción de agua del sistema de los biofiltros pues este no llegó en ningún momento al cuerpo receptor, lo que no dio paso a un muestreo en esta sección del sistema de tratamiento. Por el contrario, se pudo determinar por obstrucciones en el sistema hidráulico y material de filtrado ubicado a la salida de la laguna #2, la una fracción del afluente fue desviada por un canal que circula por el Eco-sendero, el cual marca la ruta hasta su descarga en el cuerpo receptor, uniéndose previamente con la salida de la laguna de acuacultura. Al mismo tiempo, se encontró que, por condiciones de terreno y vegetación en la ruta de descarga, el efluente sufrió cambios en su dinámica de flujo dejando una parte anegada e infiltrada en el Eco-sendero, como se observa en el Anexo O.

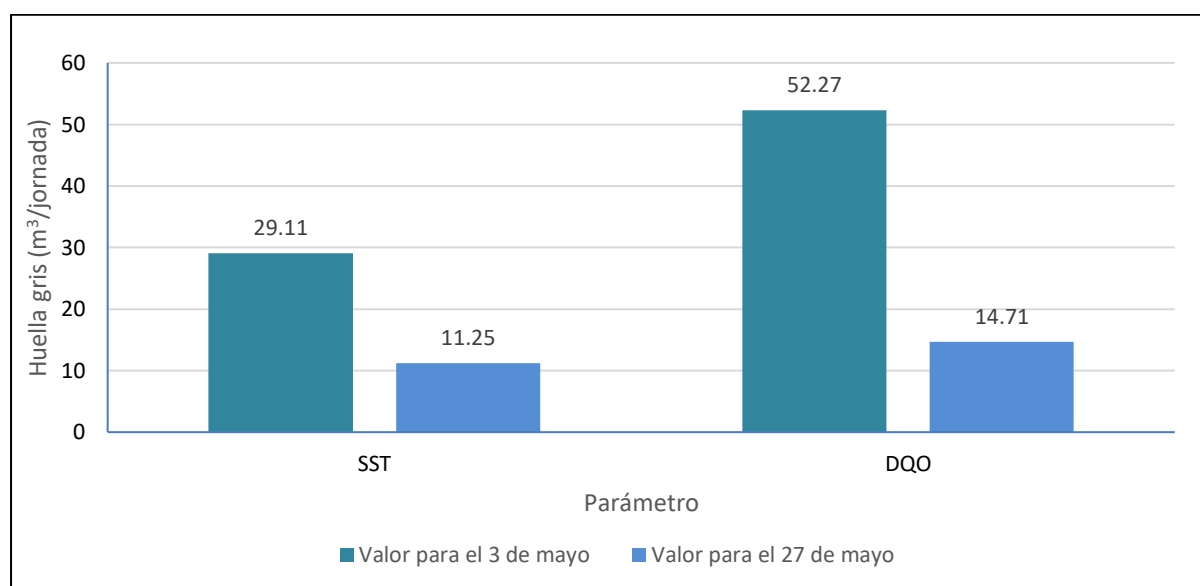
Por otra parte, es importante destacar que la fracción del agua que se desvió por el canal para esta fecha fue la única que llegó al río Yeguaré. Cuando el efluente ingresa a los biofiltros, la mayor parte se infiltra en el terreno, y los rebalses se distribuyen en el canal de la escorrentía al lote de producción La Vega (zona de producción de granos básicos de la universidad). En este sentido, se encontró que para los dos casos, los resultados de huella hídrica gris durante el proceso de producción fueron variables, tomando únicamente la carga de DQO como principal contaminante en el punto de muestreo del canal del Eco-sendero.

Conforme se observa en la Figura 10, el resultado que obtuvo la mayor huella hídrica gris correspondió al muestreo 1 debido a que presentó un mayor caudal y concentración de la DQO incrementando la carga contaminante. Aquí, la huella hídrica gris reportada en volumen sobre tiempo respondió al valor de 52.27 m³/jornada necesarios para que un cuerpo receptor logre asimilar el DQO bajo el rango máximo permisible de la norma técnica de descarga de aguas residuales a cuerpos receptores de la Secretaría de la Salud de Honduras. Se hace notar que, durante el muestreo 2, se

registró una precipitación acumulada de $19\text{mm}/\text{m}^2$ por los tres días previos lo que diluyó mayormente el efluente, y causó que otros materiales como hojas y ramas obstaculizaran su paso a través de la ruta del efluente en el Eco-sendero.

Figura 10

Comparación de la huella gris del efluente tratado en el punto del Eco-sendero, considerando la concentración actual presente en el cuerpo receptor.



No hay que descartar que el valor obtenido de la huella hídrica gris no es definitivo, pues para el caso de otros estudios se considera la carga de nitrógeno y fósforo total como contaminantes principales de este tipo de sistema de producción y con una perspectiva de ciclo de vida que incluye al mismo la huella gris de la elaboración de alimentos. Ambos nutrientes son los que presentan una mayor carga en el efluente y puede llegar incrementar esta huella hasta 802m^3 por tonelada de alimento (Babot et al., 2020). Sin embargo, dado que las unidades de tratamiento implementadas en la unidad tienen el propósito de reducir sólidos y materia orgánica, y la huella hídrica verde tampoco fue calculada, estos análisis no fueron tomados en consideración.

Eficiencia en Remoción de Materia Orgánica y Sólidos

Remoción por Unidades de Tratamiento

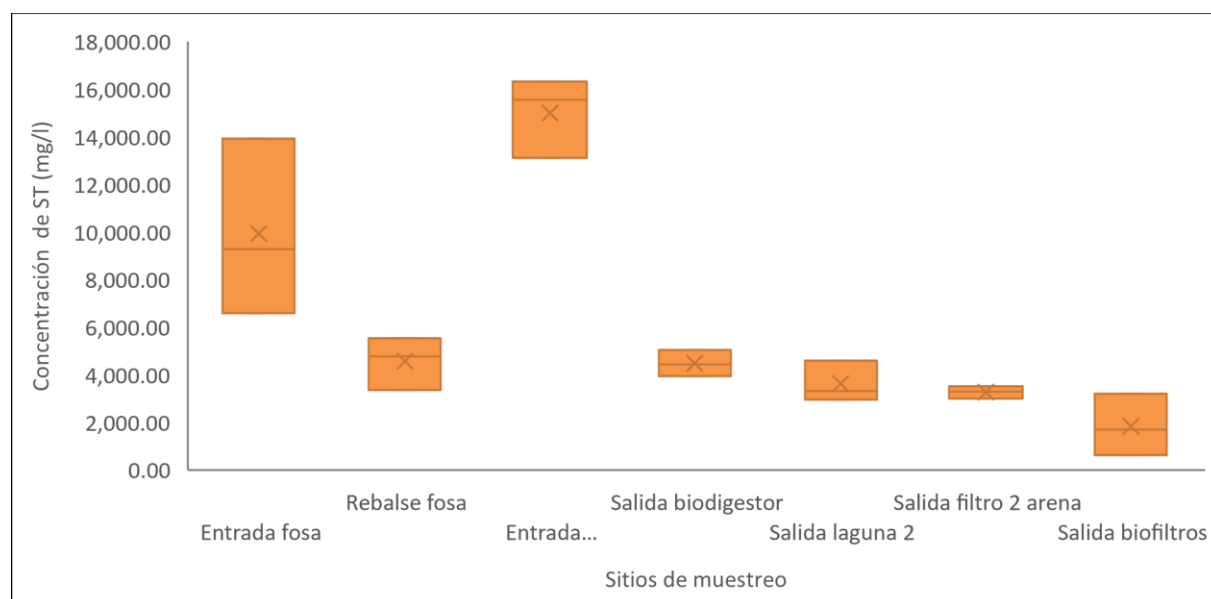
El sistema de manejo efluentes de la granja porcina se activa entre una a dos veces al día dependiendo del volumen acumulado en la fosa de acopio. De acuerdo con los datos registrados por el medidor de agua durante el tiempo de estudio, a este llegan a ingresar volúmenes entre 5.24 a 37.64 m³ por jornada. Dado que el efluente ingresa como purín o como agua de lavado a la fosa, este mantiene datos muy variables que van desde alta carga, así como baja carga. Aproximadamente el 30% de los sólidos que ingresan se sedimentan y dejan el sobrenadante en suspensión. Por tal motivo, se registró el efluente de ingreso al biodigestor como punto de partida para el cálculo de la eficiencia en remoción de las unidades de tratamiento.

Los resultados del análisis del efluente a la salida del tamizador (identificados como entrada al biodigestor) fueron los que obtuvieron valores con mayor carga orgánica por causa de la sedimentación de excretas y restos de alimento, como se aprecia en la Figura 11. Los datos promedio durante el tiempo de bombeo de la fosa al sistema de tratamiento fueron de 15,004.26mg/L de ST, y 15,003.54 mg/L de SST, de los cuales del 25 al 30% de la mezcla homogénea responde como sólidos sedimentables (Anexo P). Esta variable depende intrínsecamente del volumen de excretas generado, pues junto al desperdicio de alimentos, puede aumentar o disminuir la carga de la materia orgánica y los sólidos en el efluente.

Esto difiere con los resultados expuestos por Garzón-Zuñiga y Buelna (2013), quienes alegan que el la cantidad de DQO que se encuentra en un efluente porcino varía conforme al tamaño de una granja, para el cual puede encontrarse entre rangos de 3,478 y 9,300 mgO₂/L en las granjas pequeñas (hasta 2500 animales). Sin embargo, estas diferencias pueden estar asociadas a la acumulación de sólidos que son bombeados a las unidades de tratamiento y la eficiencia de los dispositivos utilizados como pretratamiento.

Figura 11

Distribución de los datos de sólidos totales conforme a los puntos muestreados del efluente.



Nota. El efluente a la "salida de los biofiltros" presentó mayor variación entre las muestras debido a la calidad del último muestreo, donde este se encontraba más diluido, el mismo puede apreciarse en el anexo Q.

La carga del efluente a la salida del biodigestor presentó una reducción del 70% para ST, 86% para SST y 53% para el DQO; presentando valores de 4,477.78 mg/L, 2,076.95 mg/L, y 9,106.67 mgO₂/L para cada parámetro respectivamente de acuerdo con Cuadro 13. Resultados similares fueron evidenciados por Braun (2013), en cuanto a la eficiencia de la digestión anaerobia para los sólidos suspendidos totales, encontrándose que este método de tratamiento conforma un rango del 60 al 90% de eficiencia. Así mismo, La razón principal, se da por el acondicionamiento óptimo en la ecología microbiana dentro del sistema, la cual cumple con las características multiparamétricas in situ de pH (<7.5), alcalinidad y temperatura (Cuadro 14). Para el caso de la DQO, difiere a lo reportado por Valdez et al. (2022), quienes mencionan que un que un biodigestor es capaz de disminuir en un 69 % este parámetro. Este resultado podría mejorar si se respetara el tiempo de retención hidráulica (TRH) del efluente, así como efectuar la extracción de lodos de este. Pues, durante el tiempo de medición se reportaron constantes fallos que presentó el tamizador durante los meses de muestreo al este no

lograr separar las partículas de mayor tamaño por obstrucciones, así como la prolongación de tiempos bombeos mayores a la cantidad recomendada de hasta 20 m³ diarios.

Por otro lado, el tratamiento por lagunas también presentó una reducción favorable del 63% para los sólidos suspendidos totales (SST), como se observa en la Figura 12. El resultado demostró mayor eficiencia comparado con el alcanzado en un Escalante Estrada y Alarcón Hernández (2018), donde se obtuvo únicamente una remoción del 36% posterior a la laguna anaerobia para efluentes porcinos, de acuerdo con el Cuadro 13. Esto debido a la existencia de unidades de tratamiento preliminares que contribuyen a la reducción de este parámetro antes de su ingreso a las lagunas, y manejo del efluente en que se llevó el análisis.

Al mismo tiempo, presentó remoción en la Demanda Química de Oxígeno (DQO) en un 83%, puesto que los procesos anaerobios cumplen con la función de reducir hasta el 90% de la materia orgánica en los efluentes. Estos resultados también se atribuyen a que la planta porcina añade bacterias anaerobias semanalmente, lo que propicia a la mejor degradación de la materia orgánica presente. De acuerdo con otros autores (Correa Restrepo, 2008; González Fuentes, 2013; Yanez, 1983), esta eficiencia se atribuye a la conexión en serie de las lagunas. Por tal motivo se debe de corregir la hidráulica actual de la laguna para asegurar el tiempo de residencia y el área superficial con la cuentan.

Cuadro 13

Comparación de eficiencia en depuración de materia orgánica y sólidos del efluente a través de distintas unidades de tratamiento de la planta.

Punto de medición	ST (mg/L)	SST (mg/L)	DQO (mgO ₂ /L)	% Remoción de ST	% Remoción de SST	% Remoción DQO
Entrada fosa de captación	9,931.48	7,839.25	13,136.00			
Rebalse fosa	4,559.44	1,912.67	8,617.00			
Entrada biodigestor	15,004.26	15,003.54	19,531.33			

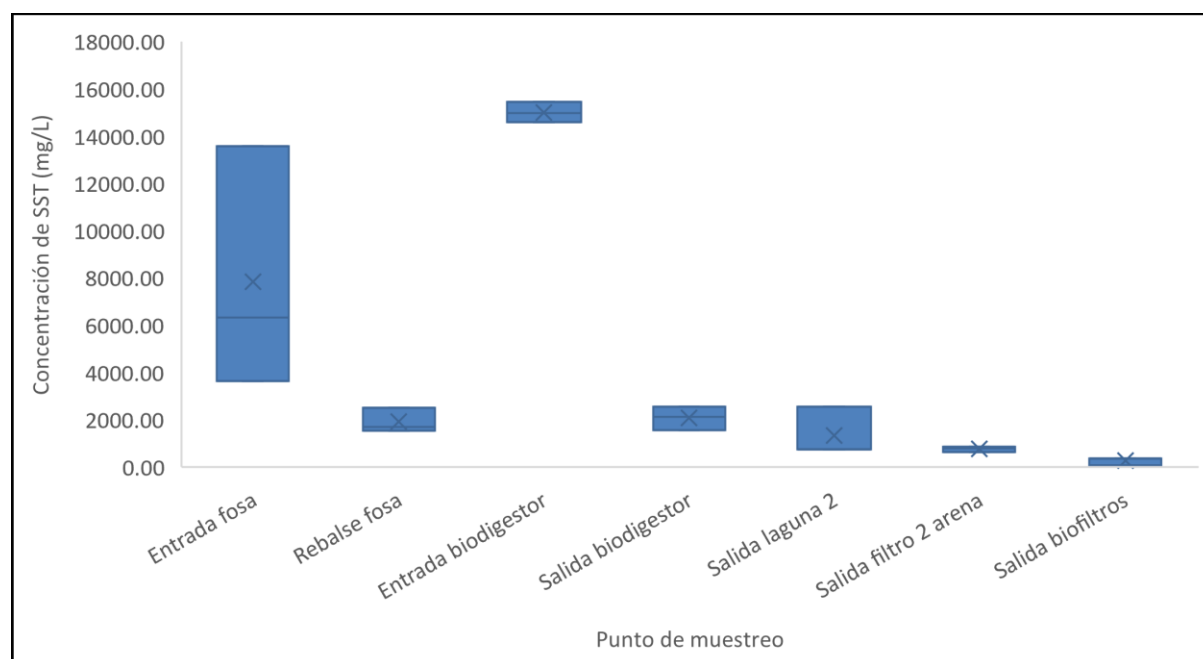
Punto de medición	ST (mg/L)	SST (mg/L)	DQO (mgO ₂ /L)	% Remoción de ST	% Remoción de SST	% Remoción DQO
Salida del biodigestor	4,477.78	2,076.95	9,106.67	70%	86%	53%
Salida laguna #2	3,625.19	677.61	1,542.33	19%	67%	83%
Salida filtro 2 de arena	3,267.22	758.93		10%	-12%	
Salida biofiltros	2,377.41	354.23	774.00	27%	53%	50%

Nota. Donde ST significa Sólidos Totales; SST, Sólidos Suspendidos Totales; y DQO, Demanda Química de Oxígeno.

En el caso de los filtros de arena y grava sí se encontró una eficiencia en la remoción de sólidos totales en un 10%. Aquí, la grava cumplió con la función de atrapar los restos de césped, insectos, u otras de partículas flotantes atraídas por el viento que pudieron caer a la laguna. Sin embargo, en promedio los resultados no demostraron una disminución para el caso de sólidos suspendidos totales dado que el tamaño de la partícula del medio filtrante no retiene sólidos en suspensión por ser de mayor tamaño, como se observa su distribución en la Figura 12 no varió con el efluente al salir de la laguna. También se determinó que la unidad se encuentra sub-dimensionada conforme al caudal del efluente tratado a la salida de las lagunas dado que en varias ocasiones el efluente al ingresar al primer tanque (conformado por piedra), el efluente se rebalsa sobre la tapadera y en algunas ocasiones cuando ingresa al tercer medio filtrante (arena) este se obstruye al no enviar el caudal completo a los biofiltros y se rebalsa sobre el canal que se dirige al Eco-sendero.

Figura 12

Comparación de remoción de sólidos suspendidos totales en cada punto de muestreo.



Nota. Las características del efluente se visualizan entre los anexos R al anexo U.

Se encontró que el efluente que ingresa a los biofiltros no es constante, pues varía según el flujo del agua que hay en el sistema una vez sale por los filtros de arena y grava. Asimismo, se encontró que la porción de efluente que llega a los biofiltros es menor comparado con la de rebalse de los filtros de arena y grava; siendo en algunas ocasiones hasta casi nulo debido a las fallas en el sistema anterior. De igual manera, el efluente una vez ingresa muchas veces se llega a infiltrar en el suelo al superar el punto de saturación dentro de las estructuras, esto a pesar de estar cubierta por geomembrana este llega a distribuir por el canal de escorrentía del lote de producción de la Vega.

Esta unidad de tratamiento reportó valores de remoción del 27% para ST, 53% para SST y 91% para DQO. Sin embargo, los valores llegaron a alcanzar esta eficiencia por la composición del efluente reportada durante el último muestreo, donde se visualizó un efluente mayormente diluido por aporte de precipitación. Aun así, no se alcanzan las concentraciones descritas por la normativa para descarga a cuerpos receptores.

Los resultados obtenidos de la calidad del efluente conforme a los parámetros evaluados se reportan en el Cuadro 14, alcanzando una reducción aproximada del 84.85% de los sólidos totales (ST), 96.04% de la Demanda Química de Oxígeno (DQO), el 97.6% de los sólidos suspendidos totales (SST), y 100% para los sólidos sedimentables desde que el efluente ingresa al biodigestor, hasta que sale por los biofiltros. A lo largo de los tratamientos no se cumple con los parámetros de la normativa de descarga a cuerpos receptores, según se observa en la Figura 14. Sin embargo, a la salida de los biofiltros, el efluente no se descarga debido al flujo inconstante por esta ruta, a la tasa evapotranspiración, y la infiltración directa en el suelo.

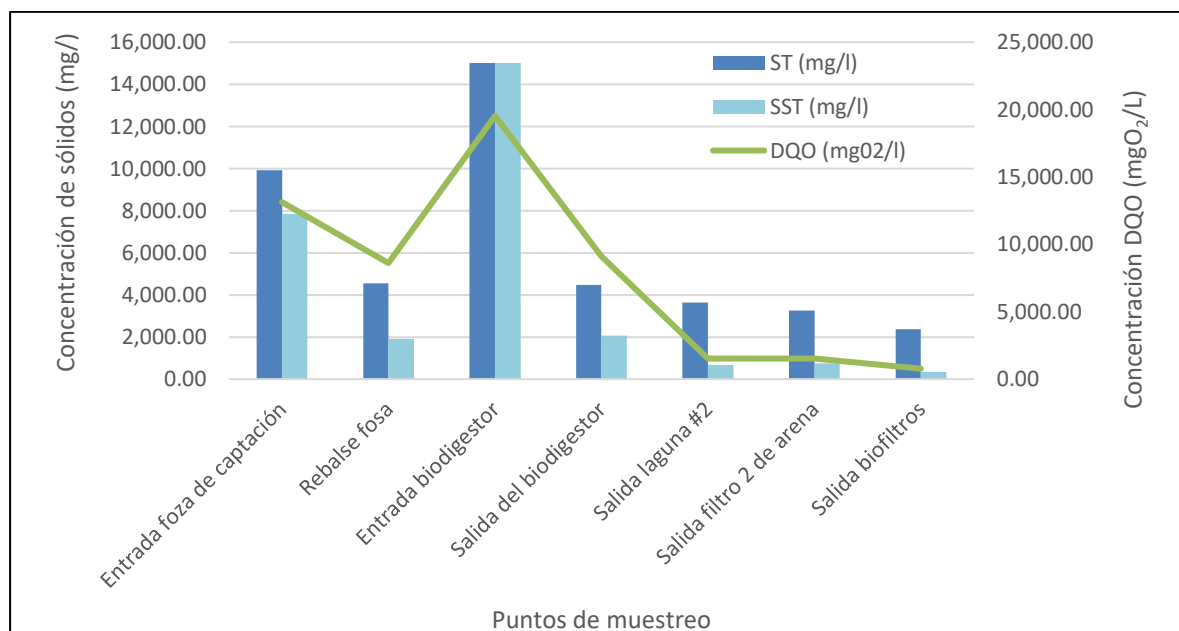
Cuadro 14

Comparación de la eficiencia en remoción de sólidos totales, sólidos suspendidos, sólidos sedimentables y demanda química de oxígeno durante los meses de marzo y abril.

Parámetro	Valor de entrada	Valor de salida	Eficiencia en remoción
Sólidos totales (mg/L)	14,934.58	2,262.5	84.85%
Sólidos suspendidos totales (mg/L)	14,780.3	354.23	97.60%
Sólidos sedimentables (mL/L)	0.25	0	100%
DQO (mg/L)	19,531.3	774	96.04%

Figura 13

Gráfico de remoción de sólidos totales (ST), sólidos suspendidos totales (SST) y demanda química de oxígeno (DQO).



Se comprueba que las prácticas de limpieza en seco implementadas por la granja en los corrales de engorde han favorecido en el control de la materia orgánica que entra al sistema. No obstante, durante las labores de limpieza, este puede presentar oportunidades de mejora al dar un mejor control del volumen de agua que ingresa como efluente a través de cambios en los sistemas de limpieza incorporando el uso de otros elementos como hidro-lavadoras.

Cabe resaltar que los resultados obtenidos no cumplen con el rango de la normativa ambiental hondureña la cual dicta que las concentraciones máximas permisibles son: 100mg/l para SST, y de 200mg/l para DQO (Secretaría de la Salud, 1996). Por lo tanto, es necesaria incorporación de otra unidad de tratamiento para cumplir con la normativa correspondiente y mantener un mejor control de la ruta del efluente. Asimismo, respetar los tiempos de retención hidráulicos de cada unidad de tratamiento y dar un mejor mantenimiento de las unidades de tratamiento, así poder asegurar que estas sean más eficientes y su diseño sea correspondiente a la capacidad diseñada.

Otros Hallazgos

Los caudales de entradas y salidas de las unidades de tratamiento que presentaron visualmente mayores variaciones fueron los reportados por el biodigestor (fuera del tiempo de medición) y la laguna #2 del sistema de tratamiento, principalmente durante la temporada lluviosa por el aporte de precipitación. Del mismo modo, en el caso de los filtros y biofiltros el flujo se vuelve difícil determinar por las características de diseño hidráulico; consecuentemente, no puede cuantificar el efluente que ingresa, y tampoco el efluente de salida.

Al mismo tiempo, se identificaron daños potenciales en el sistema de tuberías que podrán afectar el flujo de los caudales entre distintas unidades de tratamiento como se observan en la Figura 14. Dichos daños incluyen desde la formación calcárea dentro de la caja de registro donde se distribuye el efluente del biodigestor con las lagunas, tubería rota a la entrada a la laguna #1, obstrucciones por formación de sarro en la tubería del efluente al salir de las lagunas y conectar con los filtros de arena y grava, esta última visualizada en la Figura 15.

Figura 14

Formación calcárea en la caja de registro del efluente a la salida del biodigestor.



Figura 15

Formación de sarro en la tubería a la salida de la laguna #2 de cerdos.



Conclusiones

Considerando que la población de animales se ha mantenido constante durante los últimos ocho años, los factores que impactan directamente en el incremento de la demanda hídrica de la Unidad de ganado porcino son las actividades de limpieza, especialmente la del lavado de corrales. Dicha demanda depende mucho de la implementación de los protocolos de producción más limpia en las actividades de limpieza por la presencia del personal.

Considerando los parámetros analizados, la DQO representa el contaminante con mayor impacto al calcular la huella gris, sin embargo, los valores obtenidos pueden incrementar si en su estimación se incorpora el análisis de nutrientes como fósforo y el nitrógeno. En adición a la concentración, la carga del contaminante se vincula al caudal del efluente incrementando el valor de la huella gris. Las variaciones en los procesos operativos de la planta y las unidades de tratamiento contribuirán en la variabilidad de este indicador.

El desempeño del sistema de tratamiento actual de la planta no alcanza las eficiencias de remoción de materia orgánica y sólidos suspendidos totales necesarias para dar cumplimiento de los parámetros descritos por la normativa hondureña para descarga de agua residual a cuerpos receptores. Esto denota la necesidad de incorporación de otras unidades de tratamiento que contribuyan en la reducción de estos parámetros, en conjunto con el monitoreo y mantenimiento preventivo de las unidades existentes.

Recomendaciones

Incluir la jornada diaria completa para el cálculo de la demanda hídrica, esta vez bajo una perspectiva de análisis de ciclo de vida de las unidades animales producidas en la planta.

Analizar otros parámetros de contaminantes como análisis de nutrientes como nitrógeno y fósforo total, para comparar la huella hídrica gris.

Incorporar al sistema otra unidad de tratamiento, particularmente un filtro anaerobio de flujo ascendente que permita disminuir las concentraciones de materia orgánica y los sólidos suspendidos totales correspondientes al efluente ubicado a la salida de las lagunas.

Añadir al sistema de tratamiento canales Parshall prefabricado como herramienta de verificación y monitoreo del efluente tratado a la salida de los biofiltros. Así tener datos más robustos en cuanto al volumen de agua residual descargado al cuerpo receptor.

Dar mantenimiento correspondiente a las unidades de tratamiento actuales en cuanto a limpieza de lodos y cambio de tuberías, tanto para biodigestor, como de las lagunas. Asimismo, respetar los tiempos de retención hidráulica dentro de las unidades el sistema, especialmente en el caso del biodigestor.

Considerar la implementación de otro biodigestor para mejorar la eficiencia del tratamiento total del efluente.

Referencias

- Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional y Manejo Integrado de Recursos Naturales. (2009). *Guía de Buenas Prácticas Ambientales para la producción porcina*. Centro Nacional de Producción más Limpia de Honduras. http://cnpml-honduras.org/wp-content/uploads/docu_tecnicos/GBPA/GBPA_para_la_produccion_Porcina.pdf
- Almond, G. W. (1995). *Proceeding of the North Carolina Healthy Hogs Seminar: How Much Water Do Pigs Need?* North Carolina State University. https://projects.ncsu.edu/project/swine_extension/healthyhogs/book1995/almond.htm
- Armas Chuquimarca, Y. L. (2016). *Impacto de la inclusión de cerdaza como sustrato en la digestión anaerobia de purines* [Tesis]. Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras. <http://hdl.handle.net/11036/5715>
- Babot, D., Pascual, S., Cartanyà, J., Ferrer, N., García, E., Moreno, J. A. y Blanco, G. (2020). *Guía para la gestión del agua en la explotación porcina*. Interporc Spain. <https://doi.org/10.21001/gestion.agua.explotacion.porcina.2020>
- Banco Mundial. (2021). *El agua en la agricultura*. Banco Mundial. <https://www.bancomundial.org/es/topic/water-in-agriculture#1>.
- Boulanger, A. (2011). *El control del agua y su consumo en porcinos*. Sitio Argentino de Producción Animal. https://www.produccion-animal.com.ar/agua_bebida/198-control_agua_y_consumo.pdf
- Braun, R. (2013). *Eliminación mediante impactos ambientales positivos de estiércoles y purines en las empresas porcinas.: Producción de biogas*. Universidad Nacional de La Pampa. https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-inta_fericerdo_2013_purines.pdf
- Brooks, P. H., Russell, S. J. y Carpenter, J. L. (1984). Water intake of weaned piglets from three to seven weeks old. *The Veterinary Record*, 115(20), 513–515. <https://doi.org/10.1136/vr.115.20.513>
- Brumm, M. C. (2006). *Patterns of Drinking Water Use in Pork Production Facilities*. University of Nebraska. https://digitalcommons.unl.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1218&context=coopext_swine
- Cerón Hernández, V. A., Hurtado, I. C., Bolaños, I. C., Figueroa Casas, A. y Restrepo Tarquino, I. (2020). Water footprint analysis as an indicator of sustainability in nonconventional drinking water treatment systems. *DYNA*, 87(213), 140–147. <https://doi.org/10.15446/dyna.v87n213.81247>
- Correa Restrepo, G. (2008). *Evaluación y monitoreo del sistema de lagunas de estabilización del Municipio de Santa Fe de Antioquia, Colombia* [Tesis de maestría]. Universidad de Antioquia Facultad de Ingeniería Sanitaria Ambiental, Medellín. <https://bibliotecadigital.udea.edu.co/bitstream/10495/50/1/EvalMonitStmaLagunasStfeAnt.pdf>
- Di Rienzo, B. y Fogolin, G. (2017). *Aportes a la gestión de la huella hídrica en la producción de cerdos: Evaluación del uso del agua en un criadero de cerdo*. Pontificia Universidad Católica de Argentina, Argentina. <https://repositorio.uesiglo21.edu.ar/handle/ues21/13003>
- Edivan Cherubini, Guilherme Marcelo Zanghelini, Rodrigo Augusto Freitas Alvarenga, Davide Franco y Sebastião Roberto Soares (2015). Life cycle assessment of swine production in Brazil: a

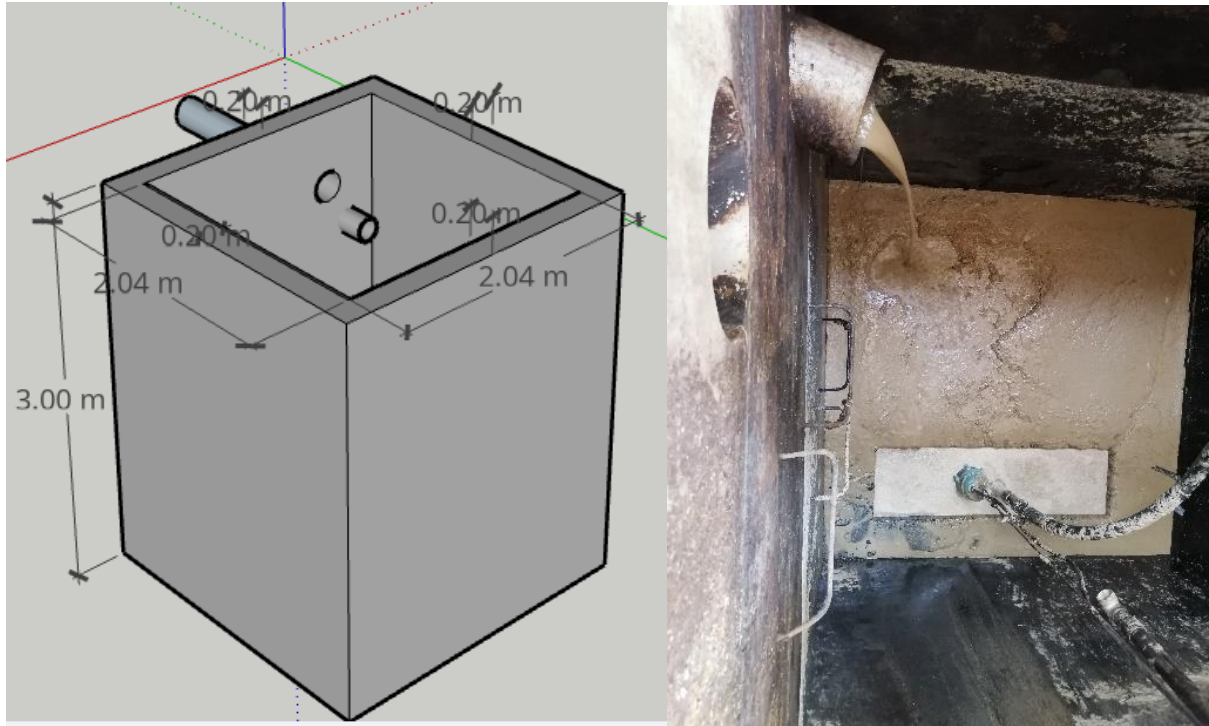
- comparison of four manure management systems. *Journal of Cleaner Production*, 87, 68–77. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.10.035>
- Escalante Estrada, V. E. y Alarcón Hernández, D. E. (2018). *Tratamiento de efluentes porcícolas en lagunas de estabilización*. Universidad Nacional Autónoma de México. <http://www.ciap.org.ar/Sitio/Archivos/Manejo%20de%20efluentes.pdf>
- Gadomski, A. (Ed.). (2021). *Biologically-Inspired Systems. Water in Biomechanical and Related Systems*. Springer International Publishing. <https://interporc.com/2020/10/07/interporc-guia-para-la-gestion-del-agua?cat=actualidad/descargas> <https://doi.org/10.1007/978-3-030-67227-0>
- Garzón-Zuñiga, M. A. y Buelna, G. (2013). *Caracterización de aguas residuales porcinas y su tratamiento por diferentes procesos en México*. Subcoordinación de Tratamiento de Aguas Residuales del IMTA, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. <http://www.scielo.org.mx/pdf/rica/v30n1/v30n1a6.pdf>
- Gill, B. P. (1989). *Water use by pigs managed under various conditions of housing, feeding, and nutrition*. University of Plymouth. <http://hdl.handle.net/10026.1/2234>
- González Fuentes, S. (2013). *Optimización de tratamiento de aguas residuales de productores de Monte Verde S. A, distrito de Monteverde, Puntarenas* [Tesis de licenciatura], Cartago. https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/3077/optimizacion_planta_tratamiento_aguas_residuales.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Hoekstra, A. Y., Chapagain, A. K., Aldaya, M. M. y Mekonnen, M. M. (2011). *The water footprint assessment manual: Setting the global standard / Arjen Y. Hoekstra ... [et al.]*. https://waterfootprint.org/media/downloads/TheWaterFootprintAssessmentManual_2.pdf
- Koncagül, E., Tran, M. y Connor, R. (2020). Water and climate change: Facts and figures. UNESCO. https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000372876_spa, checked on UNESCO.
- Malca Amaya, M. M. (2018). *Determinación de la huella hídrica en la ganadería lechera Cristo Rey, centro poblado de Otuzco-Cajamarca* [Pregrado]. Universidad Nacional de Cajamarca, Cajamarca-Perú. <https://repositorio.unc.edu.pe/bitstream/handle/UNC/2847/%E2%80%9CDETERMINACI%C3%93N%20DE%20LA%20HUELLA%20H%C3%8DDRICA%20EN%20LA%20GANADERIA%20LECHERA%20EN%20EL%20FUNDO%20CRISTO%20REY%2C%20CENTRO%20POBLAD.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Mekonnen, M. M. y Hoekstra, A. Y. (2012). A global assessment of the water footprint of farm animal products. *Ecosystems*, 15(3), 401–415. <https://doi.org/10.1007/s10021-011-9517-8>
- Menegat, M. B., Goodband, R. D., DeRouchey, J. M., Tokach, M. D., Woodworth, J. C. y and Dritz, S. S. (2019). *Kansas States University Swine Nutrition Guide: Water in Swine Nutrition*. United States. Kansas State University. <https://www.asi.k-state.edu/research-and-extension/swine/swinenutritionguide/pdf/KSU%20Water%20in%20Swine%20Nutrition%20fact%20sheet.pdf>
- Meunier-Salaün, M.-C., Chiron, J., Etoire, F., Fabre, A., Laval, A., Pol, F., Prunier, A., Ramonet, Y. y Nielsen, B. L. (2017). Review: Drinking water for liquid-fed pigs. *Animal : An International Journal of Animal Bioscience*, 11(5), 836–844. <https://doi.org/10.1017/S1751731116002202>

- Misra, S., van Middelaar, C. E., Jordan, K., Upton, J., Quinn, A. J., Boer, I. J. M. de y O'Driscoll, K. (2020). Effect of different cleaning procedures on water use and bacterial levels in weaner pig pens. *PLoS One*, 15(11), e0242495. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0242495>
- Molina, N., Umaña, J. R., Espinoza, Ninfa, García Manueles, O., Inestroza, C., Pereira, R., García, A., Márquez, S., Matínez, J. T., Dumas García, E., Fonseca, Luis, Lagos, J. A., Escobar, C. N., Escobar, J. A., Laguna, A., Portillo, F., Rubí, R., Ventura, D., Mass, M. R., . . . Fiallos, Wilfredo (SENASA/SAG) & Cruz, Elvis. (2014). *Análisis rápido de la cadena de valor porcina en la región 02, El Paraíso Honduras, Valles de Comayagua, Honduras*. Secretaría de Agricultura y Ganadería. <http://www.agronegocioshonduras.org/wp-content/uploads/2015/06/Cadena-Porcina-Comayagua.pdf>
- Morris, J. (2019). Developing and exploring indicators of water sustainable development. *Heliyon*, 5(5), e01778. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01778>
- Muhlbauer, R., Moody, L. B., Burns, R. T., Harmon, J. y Stalder, K. (2011). *Water Consumption and Conservation Techniques Currently Available for Swine Production*. University of Minnesota Digital Conservancy. <https://hdl.handle.net/11299/140901>
- Prensa-SDE (2019). Producción de cerdo crece 11.1% con apoyo del gobierno. Secretaría de Desarrollo Económico. <https://sde.gob.hn/2019/03/20/produccion-de-cerdo-crece-111-con-apoyo-del-gobierno/>
- Ruvalcaba-Gómez, J. M., Arteaga-Garibay, R. I., Domínguez-Araujo, G., Galindo-Barboza, A. J., Salazar-Rodríguez, G., Martínez-Peña, M. D. y Delgado-Macuil, R. J. (2019). Uso de bacterias ácido lácticas para la descontaminación de estiércol porcino mediante ensilaje experimental. *Revista Internacional De Contaminación Ambiental*, 35(1), 247–257. <https://doi.org/10.20937/rica.2019.35.01.18>
- Secretaría de la Salud (1996). *Normas técnicas de las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores*. (Norma de Calidad para Descarga de Aguas Residuales en Cuerpos Receptores, ACUERDO No.058). Tegucigalpa, Honduras. <http://h1.honducompras.gob.hn/Docs/Lic480BID-Mdej-002-2009407-EnmiendaAdendum.pdf>
- Segura Peñafiel, M. J. (2020). *Impacto ambiental de la producción porcina y estrategias para su mitigación*. Porcicultura.com. <https://www.porcicultura.com/destacado/Impacto-ambiental-de-la-produccion-porcina-y-estrategias-para-su-mitigacion>
- Torres Vera, C. L. (2016). *Efecto de la alimentación controlada en cerdas lactantes sobre los parámetros productivos de la granja* [Tesis, Universidad de la Salle, Bogotá]. ciencia.lasalle.edu.co. <https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1016&context=zootecnia>
- Valdez, M., Bobadilla, Y., Garcia, R., Martinez, C. y Alvarez Valencia, L. H. (2022). Influencia de la separación de agua residual porcina en fracciones sólida y líquida, en la producción de metano con lodo anaerobio granular y disperso. *Biocencia*, 24(1), 107–115. <https://doi.org/10.18633/biocencia.v24i1.1537>
- Yanez, F. (1983). *Avances en el tratamiento de aguas residuales por lagunas de estabilización*. Organización Panamericana de la Salud. <https://iris.paho.org/handle/10665.2/55778>

- Zárate Torres, É., Fernández Poulussen, A. y Kuiper, D. (2017). *Metodología para la evaluación de la huella hídrica en una cuenca hidrográfica*. IICA. <https://repositorio.iica.int/bitstream/handle/11324/2996/BVE17068913e.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- Zdzislaw Mroz, Age W Jongbloed, Nico P Lenis y Karel Vreman (1995, enero). Water in pig nutrition: physiology, allowances and environmental implications. *Nutrition Research Reviews*, 8(1). <https://www.cambridge.org/core/journals/nutrition-research-reviews/article/water-in-pig-nutrition-physiology-allowances-and-environmental-implications/FCF68130C06BBEE97818076242A0C98E>
- Zepeda Zepeda, S. A. (2017). *Estimación de la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero a partir de la implementación del biodigestor en la granja porcina de Zamorano* [Tesis de licenciatura]. Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras. <http://hdl.handle.net/11036/6198>

Anexos**Anexo A**

Diseño de la fosa de acopio de la planta porcina.



Anexo B

Separador de sólidos o tamizador de la planta porcina de Zamorano.



Anexo C

Biodigestor de la planta porcina de Zamorano.



Anexo D

Laguna #1 (anaerobia) de la planta porcina.



Anexo E

Laguna #2 de la planta porcina.



Anexo F

Filtros de grava y arena de flujo ascendente.



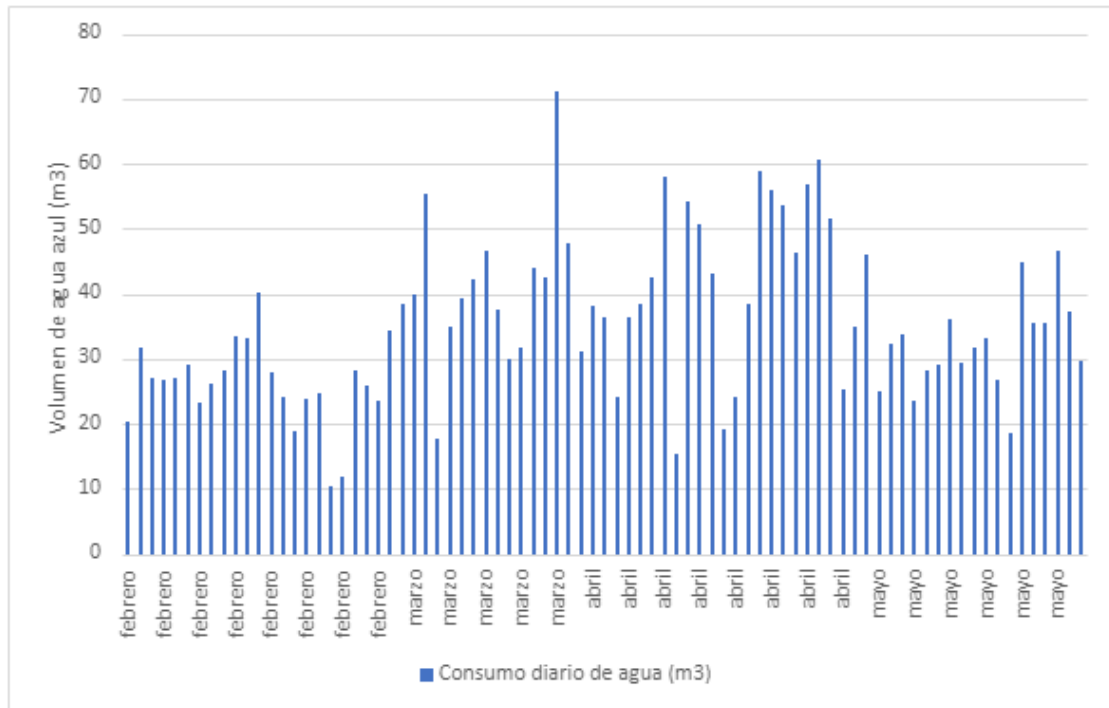
Anexo G

Biofiltro de Valeriana (Vetiveria zizanioides) y Heliconias (Heliconia L.).



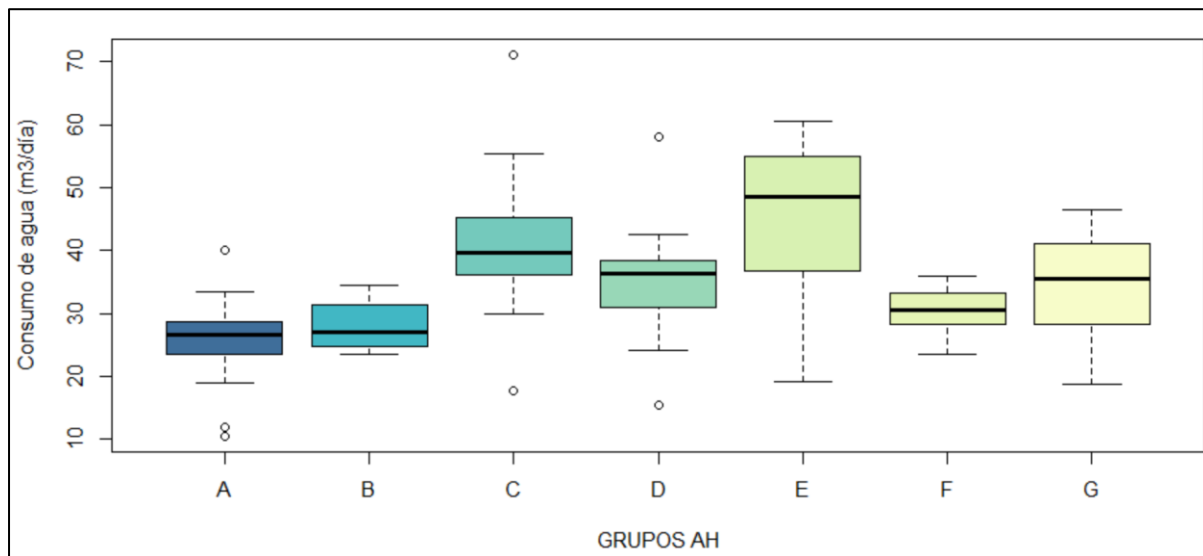
Anexo H

Monitoreo del consumo diario de la planta porcina durante febrero y mayo del 2022.



Anexo I

Gráfico del consumo de agua por grupos de Aprender Haciendo durante el tiempo del estudio.



Nota: Cada letra representó a un grupo de estudiantes de módulo de Aprender Haciendo.

Anexo J

Tuberías de charcas abiertas para las labores de limpieza en el edificio del Engorde 1.



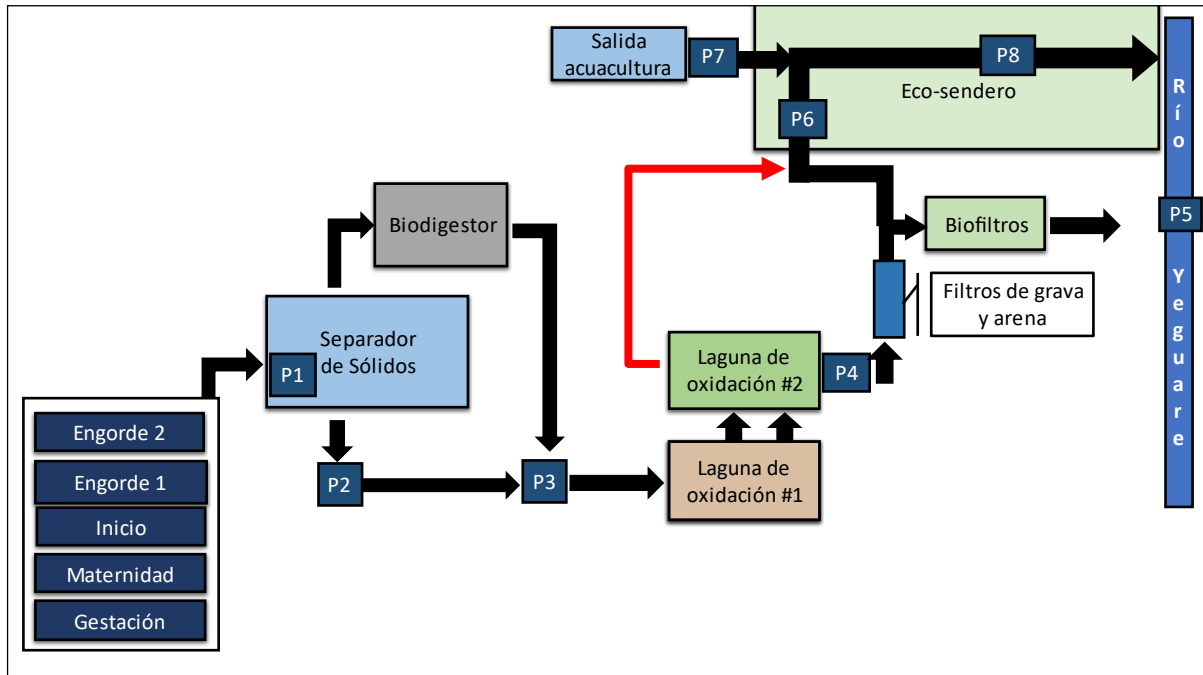
Anexo K

Punto de salida del “rebalse de la laguna #2” durante las jornadas de muestreo de la huella hídrica.



Anexo L

Ruta de salida proveniente del punto de rebalse laguna #2.



Anexo M

Parámetros in-situ de los puntos en la ruta del efluente muestreada para el día 3 de mayo.

Sitio	pH	Temp.(°C)	Cond. (mS/cm ²)	SALT (ppt)	TDS (ppt)
Entrada fosa	7.38	25.7	3.16	1.6	2.25
Entrada biodigestor	7.58	26	4.38	2.3	3.07
Salida biodigestor	7.32	26.9	6.82	3.7	4.85
Salida laguna #2	8.3	25	3.67	1.9	2.62
Rebalse laguna #2	8.19	24.60	3.81	2.00	2.70
Canal eco-sendero	8.24	22.4	3.25	1.7	2.29
Salida Acuicultura	7.08	26.9	0.2	0.1	0.142
Mezcla acuicultura	7.24	25.9	0.281	0.1	0.2
Río Yeguaré	7.59	0.209	26.1	0.148	0.1

Anexo N*Parámetros in-situ de los puntos en la ruta del efluente para el 27 de mayo.*

Sitio	pH	Cond. (mS/cm)	Temp.(°C)	TDS (ppt)	SALT (ppt)
Entrada fosa	7.23	4.41	25.1	3.15	2.3
Entrada biodigestor	6.68	5.52	25.5	3.9	3
Salida biodigestor	6.99	6.2	26.2	4.4	3.3
Salida laguna #2	8.18	3.93	26.2	2.77	2.1
Canal eco-sendero	8.12	2.92	22.3	2.08	1.5
Rebalse laguna #2	8.12	4.03	24.7	2.87	2.1
Salida Acuacultura	6.78	0.243	25.8	0.172	0.1
Mezcla acuacultura	7.03	0.29	25.3	0.205	0.1
Río Yeguaré	7.08	0.1085	23.3	0.774	0

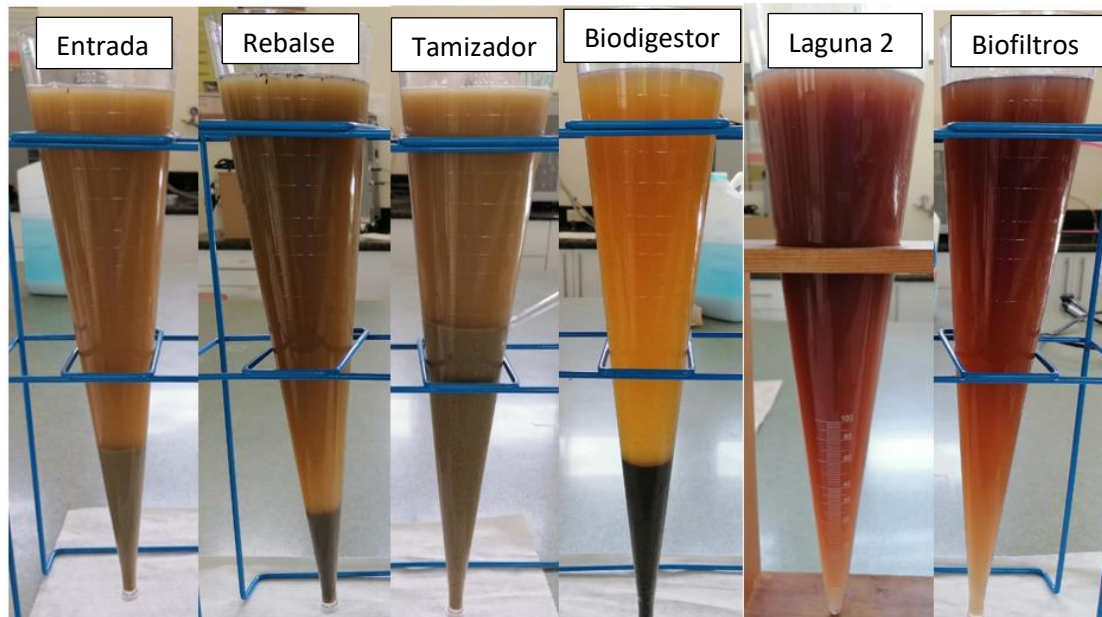
Anexo O

Anegamiento del efluente de la planta porcina en el canal del Eco-sendero.



Anexo P

Comparación de sólidos sedimentables por el método de conos Imhoff durante 1 hora.



Anexo Q

Comparación visual del efluente en el punto de salida de los biofiltros.



Anexo R

Parámetros in situ promedio de los puntos del efluente a través de las distintas unidades de tratamiento.

Sitio	pH	Temp. (°C)	Cond. (ms/cm)	TDS (ppm)	SALT (ppt)
Entrada efluente crudo	8.19	24.8	4.79	3.40	2.57
Rebalse de fosa	6.50	25.03	5.04	3.58	2.73
Entrada biodigestor	6.9	25.2	5.91	4.15	3.2
Salida del biodigestor	7.22	26.67	6.57	4.71	3.67
Salida laguna #2	7.90	26.50	4.62	3.28	2.45
Salida filtro 2 de arena	8.27	23.97	4.61	3.27	2.47
Salida de biofiltros	8.02	25.10	3.21	2.28	1.70

Anexo S

Resumen de resultados de los sólidos totales en distintos puntos del efluente entre los muestreos de marzo y abril.

Punto de muestreo	Sólidos totales (mg/l)			
	Rango	Media	Mediana	Desviación estándar
Entrada efluente crudo	6588.89 - 13932.22	9931.48	9273.33	3033.81
Rebalse fosa	3365.56 - 5531.67	4559.44	4781.11	898.09
Entrada biodigestor	13124.44 - 16326.67	15004.26	15561.67	1365.43
Salida biodigestor	3943.33 - 5052.22	4477.78	4437.78	453.58
Salida laguna #2	2962.22 - 4595.56	3625.19	3317.78	701.34
Salida filtros de arena	3000 - 3508.33	3267.22	3293.33	208.35
Salida biofiltros	631.11 - 3296.67	2377.41	3204.44	1235.39

Anexo T

Resumen de resultados de los sólidos suspendidos totales en distintos puntos del efluente entre los muestreos de marzo y abril.

Punto de muestreo	Sólidos suspendidos totales (mg/l)			
	Rango	Media	Mediana	Desviación estándar
Entrada efluente crudo	3636.40 - 13566.67	7839.25	6314.71	4194.91
Rebalse fosa	1543.54 - 2500.00	1912.67	1694.47	419.85
Entrada biodigestor	14593.94 - 15450.00	15003.54	14966.67	350.46
Salida biodigestor	1563.89 - 2553.33	2076.95	2113.64	404.77
Salida laguna #2	564.58 - 736.11	677.61	732.14	79.94
Salida filtros de arena	637.5 - 858.33	758.93	780.95	91.49
Salida biofiltros	75.74 - 359.26	261.40	349.21	131.35

Anexo U

Resumen de resultados de la demanda química de oxígeno (DQO) en distintos puntos del efluente entre los muestreos de marzo y abril.

Punto de muestreo	Demanda química de oxígeno (mg O ₂ /l)			
	Rango	Media	Mediana	Desviación estándar
Entrada efluente crudo	7800 - 16898	13136.00	14710.00	3877.41
Rebalse fosa	7441 - 9478	8617.00	8932.00	860.91
Entrada biodigestor	13670 - 23300	19531.33	21624.00	4200.69
Salida biodigestor	6000 - 11190	9106.67	10130.00	2238.96
Salida laguna #2	1415 - 1738	1542.33	1474.00	140.44
Salida biofiltros	215 - 1069	774.00	1038.00	395.48