

DOI: <https://doi.org/10.56712/latam.v5i6.3231>

Análisis de sistemas de tratamiento de agua basados en la naturaleza en comunidades del Chaco paraguayo, año 2024

Analysis of nature-based water treatment systems in Paraguayan Chaco communities, year 2024

Nolberto Valdez

nolber88@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0005-3750-1719>

Pro Comunidades Indígenas: PCI

Filadelfia – Paraguay

Karl Giesbrecht

<https://orcid.org/0009-0001-5221-7899>

Pro Comunidades Indígenas: PCI

Filadelfia – Paraguay

Artículo recibido: 14 de diciembre de 2024. Aceptado para publicación: 31 de diciembre de 2024.

Conflictos de Interés: Ninguno que declarar.

Resumen

El acceso al agua segura persiste como un reto fundamental en el Chaco paraguayo, particularmente para comunidades rurales e indígenas. Este estudio analiza la implementación y efectividad de sistemas de tratamiento de agua basados en filtración lenta ecológica en las comunidades Cucaani, Guida Ichai y Colonia María Auxiliadora. La investigación adoptó un enfoque metodológico mixto, combinando análisis técnico de una planta piloto experimental y trabajo de campo con entrevistas semiestructuradas y observación no participante en las comunidades beneficiarias. El sistema estudiado incorpora tres etapas de filtración lenta ecológica: pre-filtración con grava, biofiltración con arena y adsorción con biocarbón, complementado con cloración final. Los resultados evidencian una mejora significativa en la calidad del agua tratada, con una eficiencia de remoción de turbidez que alcanzó el 74.47% en la etapa final del estudio. Si bien el efluente final superó el límite de turbidez recomendado por la OMS, representa una mejora sustancial respecto a la situación inicial donde las comunidades consumían agua cruda con altos niveles de turbidez. Las entrevistas en las comunidades revelaron mejoras en la calidad de vida de los usuarios. La experiencia demuestra que estos sistemas son operativamente viables y sostenibles, debido principalmente a su diseño simplificado y bajos costos de mantenimiento. El éxito del modelo ha impulsado su adopción por instituciones gubernamentales como SENASA y MOPC para implementar sistemas similares de macrocaptación con tratamiento ecológico en otras comunidades del Chaco. El estudio contribuye a la identificación de soluciones prácticas para el acceso a agua segura en comunidades rurales del Chaco paraguayo.

Palabras clave: tratamiento de agua, filtración lenta ecológica, comunidades indígenas, Chaco paraguayo, agua segura

Abstract

Access to safe water remains a significant challenge in the Paraguayan Chaco, especially in rural and indigenous communities. This study analyzes the implementation and effectiveness of nature-based water treatment systems in three communities: Cucaani, Guida Ichai, and Colonia María Auxiliadora. The research adopted a mixed methodological approach, combining technical analysis of an experimental pilot plant and fieldwork with semi-structured interviews and non-participant observation in beneficiary communities. The studied system incorporates three stages of ecological slow filtration: gravel pre-filtration, sand biofiltration, and biochar adsorption, complemented with final chlorination. Results show significant improvement in treated water quality, with turbidity removal efficiency reaching 74.47% in the final stage of the study. Although the final effluent exceeded WHO's recommended limit on turbidity, it represents a substantial improvement from the initial situation where communities consumed raw water with high turbidity levels. Community interviews revealed improvements in users' quality of life. The experience demonstrates that these systems are operationally viable and sustainable, mainly due to their simplified design and low maintenance costs. The model's effectiveness has led to its adoption by government institutions such as SENASA and MOPC, which have implemented similar macro-catchment systems with ecological treatment in other Chaco communities. The study contributes to identifying practical solutions for safe water access in rural communities of the Paraguayan Chaco.

Keywords: water treatment, ecological slow filtration, indigenous communities, Paraguayan Chaco, safe water

Todo el contenido de LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades, publicado en este sitio está disponibles bajo Licencia Creative Commons.



Cómo citar: Valdez, N., & Giesbrecht, K. (2024). Análisis de sistemas de tratamiento de agua basados en la naturaleza en comunidades del Chaco paraguayo, año 2024. *LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades* 5 (6), 3142 – 3156. <https://doi.org/10.56712/latam.v5i6.3231>

INTRODUCCIÓN

El acceso al agua segura continúa siendo uno de los mayores desafíos para las comunidades rurales e indígenas del Chaco paraguayo. Las características hidrogeológicas de la región, donde predominan acuíferos con agua salobre no apta para consumo humano, obligan a las comunidades a depender principalmente de aguas superficiales como ríos y tajamares, frecuentemente sin ningún tipo de tratamiento previo a su consumo.

En el caso de las comunidades ribereñas, el agua del río presenta altos niveles de turbidez y contaminación microbiológica, mientras que en las comunidades de tierra adentro, los tajamares son susceptibles a la contaminación por actividades ganaderas y a problemas de disponibilidad durante las sequías prolongadas. La situación se agrava por la insostenibilidad de los sistemas convencionales de tratamiento, que requieren insumos químicos costosos y mantenimiento especializado, recursos frecuentemente inaccesibles para estas comunidades.

Ante esta problemática, desde 2020 se han desarrollado alternativas de tratamiento basadas en la naturaleza que aprovechan materiales localmente disponibles y procesos de filtración lenta biológica. Estos sistemas, inicialmente implementados por Pro Comunidades Indígenas (PCI) en comunidades del Alto Paraguay, han demostrado ser sostenibles tanto en términos operativos como de aceptación comunitaria (Giesbrecht et al., 2023).

La eficacia demostrada del modelo ha llevado a su adopción por instituciones gubernamentales como el SENASA (Servicio Nacional de Saneamiento Ambiental) y el MOPC (Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones), que han implementado sistemas de macrocaptación con tratamiento basado en la naturaleza en diversas comunidades del Chaco, representando un importante avance en las políticas públicas de acceso al agua (SENASA, 2024; MOPC, 2024).

El presente estudio busca analizar la eficiencia técnica y la viabilidad socioeconómica de estos sistemas de tratamiento basados en la naturaleza, a través del monitoreo de una planta piloto y la evaluación de sistemas en funcionamiento en tres comunidades del Chaco. La investigación se centra en evaluar no solo los parámetros técnicos del tratamiento, sino también los factores sociales y operativos que contribuyen a su sostenibilidad a largo plazo.

Los hallazgos de este análisis contribuyen al desarrollo de soluciones prácticas y sostenibles para mejorar el acceso a agua segura en comunidades rurales del Chaco paraguayo. El estudio demuestra cómo la combinación de tecnologías apropiadas con gestión comunitaria puede generar alternativas viables para reducir las brechas en el acceso a servicios básicos entre zonas urbanas y rurales del país.

METODOLOGÍA

La investigación se desarrolló entre junio y noviembre de 2024, adoptando un enfoque metodológico mixto que combinó técnicas cualitativas y cuantitativas. El componente central del estudio fue el análisis técnico de una planta piloto experimental instalada en el predio de la empresa MZ Ingeniería S.R.L., ubicada en Remansito, distrito de Villa Hayes, departamento de Presidente Hayes, en el marco de una cooperación PCI-MZ-WWF con el objetivo de estudiar en un periodo de 1 año distintas modalidades de filtrado lento de agua de río y sus respectivos resultados.

La planta piloto fue diseñada como una réplica a escala de los sistemas de tratamiento ecológico basados en la naturaleza que PCI (Pro Comunidades Indígenas) viene implementando en dos

comunidades indígenas y una comunidad campesina del Chaco paraguayo, siguiendo los principios de diseño establecidos en estudios previos (Giesbrecht et al., 2023).

El diseño se basó en los principios de filtración lenta, donde el proceso de purificación ocurre mediante múltiples mecanismos, incluyendo tamizado, sedimentación, adsorción, oxidación y acción bacteriana (ENOHSA, 2024). La formación de la capa biológica o *schmutzdecke* en la superficie del lecho filtrante es fundamental para la eficiencia del sistema, particularmente en la remoción de contaminantes microbiológicos.

El diseño experimental consistió en la implementación de una planta prototipo que incorpora cuatro etapas principales de filtración lenta ecológica: pre-filtración, con un filtro mecánico de anillado para evitar la entrada de partículas orgánicas; filtración con grava gruesa para remover sedimentos y materia orgánica; biofiltración con arena para remover partículas finas y patógenos microbianos, y adsorción con biocarbón para eliminar contaminantes orgánicos (Kearns, 2007).

Así mismo, el conjunto del sistema de la planta piloto incluyó el pre-filtro mecánico con cartucho lavable, tres tanques filtros por gravedad de 1 m³ instalados en serie y cerrados completamente, un sistema de bombeo y compresor para retrolavado, un caudalímetro para medición precisa del flujo, un tanque de agua tratada de 2 m³ y un expendedor de cloro.

Para evaluar el funcionamiento del sistema, se realizaron mediciones diarias de turbidez en cinco puntos específicos: salida de agua cruda, salida del pre-filtro, y salida de cada uno de los tres filtros. Las mediciones se efectuaron cada hora durante ocho horas diarias por un período de seis meses, experimentando con doce configuraciones distintas de filtrado lento, siguiendo protocolos estandarizados (MZ Ingeniería, 2024). La documentación técnica incluyó registros fotográficos y anotaciones sobre el comportamiento del sistema bajo diferentes condiciones operativas y climáticas.

El trabajo de campo abarcó tres comunidades con sistemas similares en funcionamiento: las comunidades indígenas Cucaani y Guida Ichai del pueblo Ayoreo, ubicadas en el distrito de Carmelo Peralta, y la Colonia María Auxiliadora, una comunidad campesina del distrito de Fuerte Olimpo, todas en el departamento de Alto Paraguay. La recolección de datos incorporó entrevistas semiestructuradas con informantes clave y observación no participante para evaluar aspectos técnicos, sociales y de gestión comunitaria, metodología que ha demostrado ser efectiva en estudios previos de sistemas de agua comunitarios (Di Bernardo, 2004).

Los datos cuantitativos de turbidez fueron procesados mediante estadística descriptiva, estableciendo promedios y tendencias para cada configuración probada. Las entrevistas fueron grabadas en audio, transcritas y analizadas mediante análisis temático para identificar patrones recurrentes sobre la operación, mantenimiento e impacto del sistema en las comunidades. La investigación también incluyó una revisión exhaustiva de documentación técnica, incluyendo el manual de operación y mantenimiento de los sistemas (SENASA, 2024) e informes de seguimiento de las plantas en funcionamiento.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La investigación documenta la evolución de un sistema de tratamiento de agua basado en la naturaleza, implementado inicialmente en 2021 en la comunidad ayoreo Cucaani, distrito de Carmelo Peralta, Departamento de Alto Paraguay, captando agua de río, y posteriormente replicado y adaptado en otras comunidades del Chaco paraguayo. El desarrollo de este sistema surgió como respuesta a las

limitaciones de los sistemas convencionales de tratamiento, que resultaban insostenibles debido a sus altos costos operativos y requerimientos de mantenimiento especializado.

Figura 1

Sistema de tratamiento de agua en la Colonia María Auxiliadora



Nota: Toma de la Planta de Tratamiento de la Colonia María Auxiliadora [Fotografía], PCI, 2024.

La implementación en la Colonia María Auxiliadora (Figura 1) confirmó la viabilidad del sistema para el tratamiento de agua de tajarar. El impacto en la comunidad ha sido transformador, como detalla Segovia (2024), presidente de la Junta de Saneamiento:

Hasta este momento no tuvimos problemas mayores con este nuevo sistema de agua. Las motobombas instaladas son originales todavía desde su instalación en 2021; una sumergible del tajarar (1 HP) y la otra para levantar al agua tratada al tanque elevado de distribución (2,5 HP). Anteriormente, cuando teníamos el sistema convencional, cada mes, en promedio, solicitábamos colaboración a la comunidad para la compra de una motobomba nueva, porque se quemaba.

La sostenibilidad del sistema en Colonia María Auxiliadora se evidencia también en la gestión comunitaria, como señala Segovia:

Siempre se necesita una persona responsable que cuide este sistema, aunque sea automático. Las 24 horas tenemos agua ahora en la comunidad y llega a toda la población, hasta 5 km. El sistema convencional no llegaba a toda la población.

La mejora en la calidad del agua es notable:

Anteriormente, cuando no teníamos este sistema, para lavar ropa, por ejemplo, teníamos que buscar la forma para decantar primero el agua, porque lavando en esas condiciones, la ropa salía amarillenta o con manchas. Mucho menos esta agua servía para tomar en esas condiciones. Actualmente, esta agua

tratada ya en la planta, la utilizamos para consumo humano, tareas domésticas e incluso para la producción" (Segovia, 2024).

Figura 2



Sistema de tratamiento de agua en la comunidad Cucaani

Nota: Toma de la Planta de Tratamiento de la comunidad Cucaani [Fotografía], PCI, 2021.

El primer sistema de filtración lenta ecológica se implementó en Cucaani a mediados de 2021 (Figura 2), iniciando con la construcción de un sistema para el tratamiento de agua del río Paraguay. En esta implementación, se utilizaron biofiltros con una capacidad de 250 litros, adaptados a una población de aproximadamente 10 familias.

"Funciona muy bien el sistema, pero ahora mismo tenemos un problema de quema de la bomba de empuje del río. La gente ya no se acostumbra ahora a tomar agua cruda del río, por eso estamos viendo para solucionar" (Cutamuraja, 2024). Este testimonio refleja tanto el cambio en los hábitos de consumo como la apropiación del sistema por parte de la comunidad.

Figura 3

Sistema de tratamiento de agua en la comunidad Guida Ichai

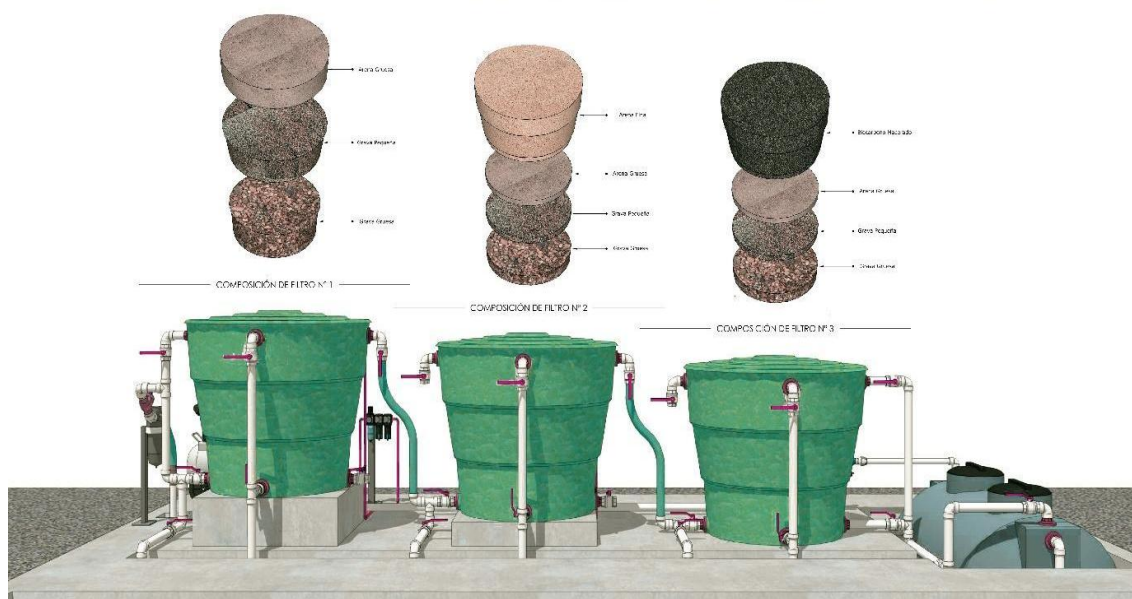


Nota: Toma de la Planta de Tratamiento de la comunidad Guida Ichai [Fotografía], PCI, 2024.

A fines del 2022, el sistema se implementó en Guida Ichai (Figura 3), incorporando mejoras basadas en las experiencias previas, como la instalación de un regulador de presión después del pre-filtro mecánico para optimizar el control del caudal. Esta instalación beneficia a aproximadamente 20 familias y utiliza tanques de 1.000 litros para los biofiltros. "Al principio le costaba a la gente de mi comunidad consumir agua clorada, pero luego regulamos un poco más la inyección de cloro y ya se acostumbraron. El agua sale limpia y tenemos cerca de nuestras casas las canillas" (De la Cruz, 2024).

Figura 4

Composición de los filtros ecológicos y diagrama del sistema de tratamiento piloto

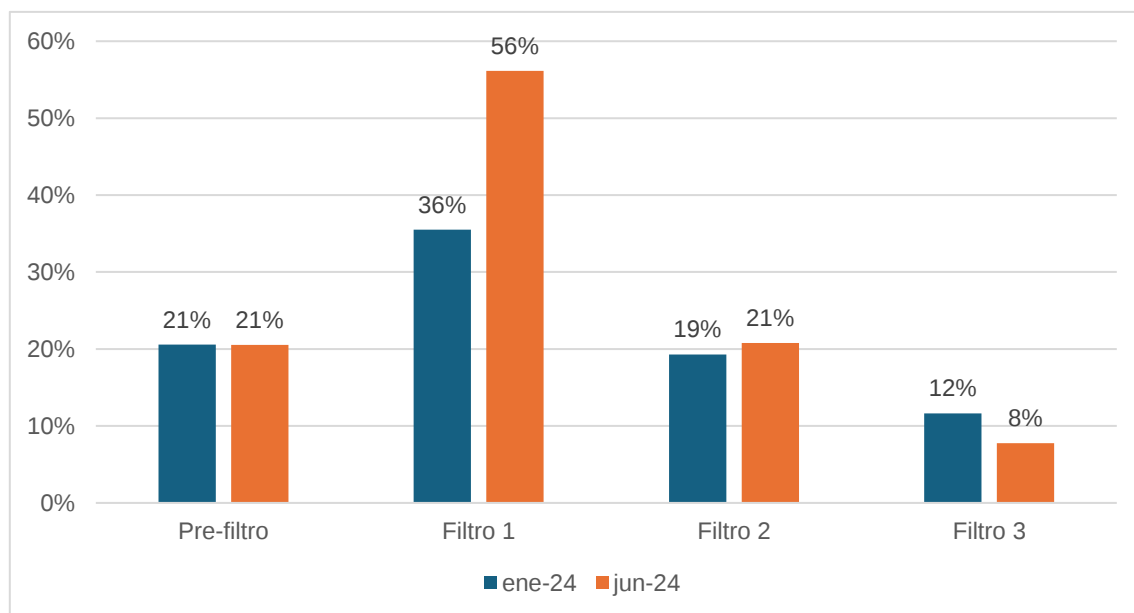


Nota: Planta Piloto de Tratamiento en Remansito [Diagrama], MZ Ingeniería, 2023.

Para validar y optimizar sistemáticamente el diseño implementado en estas comunidades, se desarrolló una planta piloto experimental en Remansito (Figura 4). Los datos recolectados durante seis meses de monitoreo mostraron una mejora significativa en la eficiencia del sistema (Gráfico 1).

Gráfico 1

Eficiencia de remoción de turbidez por etapa de tratamiento



Fuente: Elaboración propia con datos de la planta piloto, Remansito 2024

El análisis del rendimiento de la planta piloto muestra una mejora significativa en la eficiencia de remoción de turbidez en cada etapa del tratamiento. Como se observa en el Gráfico 1, el Filtro 1 experimentó el mayor incremento en eficiencia, pasando de 36% en enero a 56% en junio de 2024.

Gráfico 2

Valores de turbidez (NTU) promedio en las diferentes etapas del sistema de tratamiento

Fuente: Elaboración propia con datos de la planta piloto, Remansito 2024

La progresión de la calidad del agua a través del sistema se evidencia en el Gráfico 2, donde se observa una reducción gradual de la turbidez en cada etapa del tratamiento, desde valores iniciales superiores a 70 NTU hasta alcanzar niveles finales cercanos a 18 NTU.

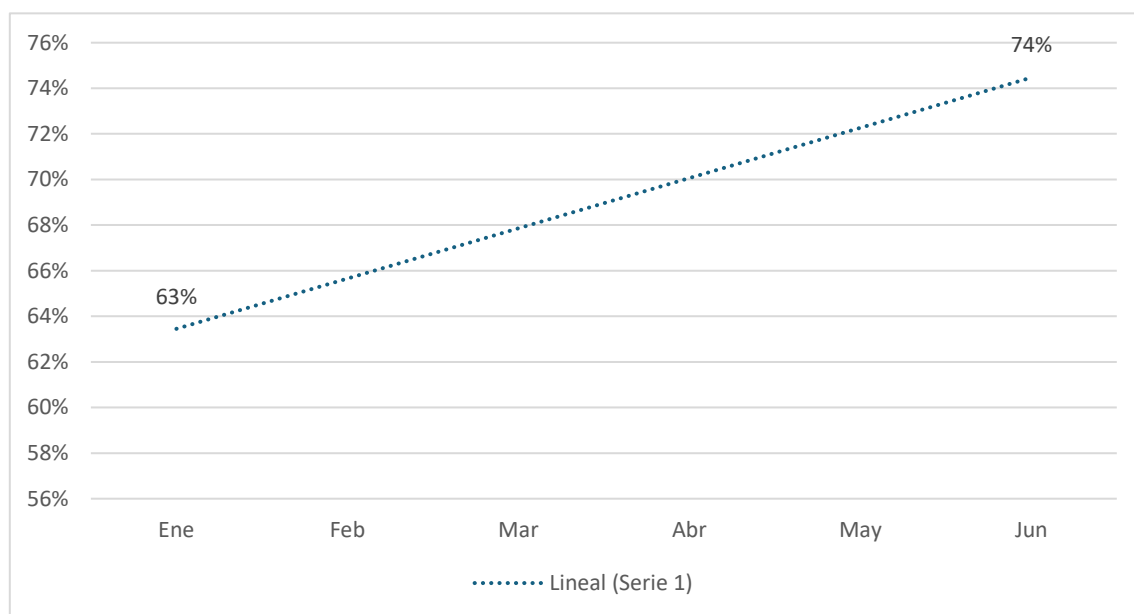
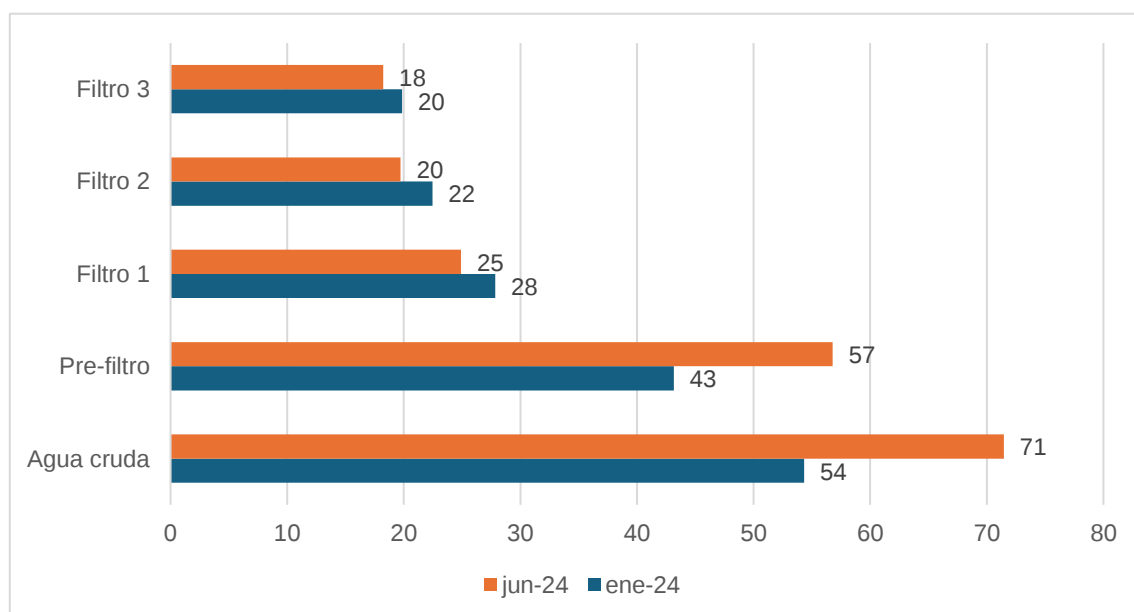


Gráfico 3

Serie temporal de la eficiencia total del sistema



Fuente: Elaboración propia con datos de la planta piloto, Remansito 2024.

La eficiencia total del sistema mostró una tendencia positiva constante durante el período de estudio (Gráfico 3), incrementándose del 63.45% en enero al 74.47% en junio de 2024. Esta mejora en el rendimiento del sistema podría atribuirse a la maduración del proceso de filtración lenta biológica, particularmente en el Filtro 1, donde la formación de la capa biológica o *schmutzdecke* alcanza su óptimo desarrollo después de varios meses de operación (ENOHSA, 2024).

Los resultados positivos de estas experiencias iniciales han llevado a la adopción del modelo por instituciones estatales, que han implementado sistemas de macrocaptación con tratamiento basado en la naturaleza. Los sistemas de macrocaptación consisten en una superficie de varias hectáreas especialmente preparada con canales y camellones para captar y juntar el agua de lluvia, que luego es bombeada a un amplio reservorio protegido con geomembrana para evitar la infiltración (Giesbrecht et al., 2023).

Por ejemplo, SENASA ha implementado estos sistemas en el Complejo comunitario La Patria del distrito de Puerto Pinasco y en el Complejo comunitario Laguna Negra-Ñandeva de Mariscal Estigarribia, beneficiando a aproximadamente 4.000 personas (SENASA, 2024). Por su parte, el MOPC, a través de la Dirección de Agua Potable y Saneamiento (DAPSAN), ha construido un sistema similar en Campo Loa que incluye 14 hectáreas de camellones, un reservorio pulmón de 10.000 m³, un reservorio principal de 45.000 m³ y una planta de tratamiento basada en la naturaleza (MOPC, 2024).

Tabla 1

Análisis laboratorial de agua de la planta de tratamiento de Campo Loa

	pH Unidades	Turbidez Ntu	Nitratos/Nitrat mg	Nitritos/Nitrit mg/
24082016 Tajamar	-	171,00	-	
24082017 Filtrado c/cloro	-	0,00	0	Negativo
24082018 Tratamiento Filtrado	7,28	1,00	0	Negativo

Fuente: Elaboración propia a partir de resultados de análisis, Cooperativa Chortitzer Ltda., agosto de 2024

Particularmente notable es el caso de Campo Loa, donde los análisis laboratoriales (Tabla 1) muestran una reducción de turbidez de 171 NTU a 1 NTU en el agua tratada, con ausencia de coliformes totales y fecales después de la cloración (Cooperativa Chortitzer, 2024). Estos resultados superiores pueden atribuirse al uso de filtros de mayor capacidad (5.000 litros) en comparación con los sistemas comunitarios iniciales.

La filtración lenta a través de lechos de arena graduada ha demostrado ser, en ciertas circunstancias, el método más económico y eficiente para el tratamiento de agua, especialmente en núcleos poblacionales pequeños y áreas rurales (ENOHSA, 2024). Este proceso, que combina operaciones físicas y biológicas complejas, puede mejorar significativamente la calidad física, química y bacteriológica de aguas superficiales con bajas concentraciones de turbidez y color.

Si bien los niveles de turbidez en el efluente final de la planta piloto (18.24 NTU) superaron el límite de 5 NTU recomendado por la OMS (2011), estos resultados representan una mejora sustancial respecto a la situación inicial, siendo que la inocuidad bacteriológica se resuelve con la cloración del agua tratada. Más importante aún, la sostenibilidad operativa y la aceptación comunitaria demostradas por estos sistemas, junto con su adopción institucional, sugieren que constituyen una solución viable y escalable para comunidades rurales del Chaco paraguayo.

CONCLUSIONES

El sistema de tratamiento de agua basado en la naturaleza, evaluado a lo largo de su implementación en tres comunidades del Chaco paraguayo y validado mediante una planta piloto experimental, representa un avance significativo en el acceso a agua segura para comunidades rurales. La experiencia documentada desde 2021 en la comunidad Cucaani, la Colonia María Auxiliadora hasta su más reciente implementación en Guida Ichai demuestran la adaptabilidad y efectividad del sistema en diferentes contextos.

El éxito del sistema radica principalmente en su diseño simplificado y en la eliminación de insumos químicos costosos, lo que ha permitido superar las limitaciones de sostenibilidad que caracterizaban a los sistemas convencionales. Los testimonios de los usuarios evidencian mejoras sustanciales tanto en la disponibilidad como en la calidad del agua, con un servicio continuo que alcanza a toda la población y costos de mantenimiento manejables para la comunidad.

La configuración en serie de los tres filtros ha demostrado ser efectiva para la remoción progresiva de turbidez, alcanzando una eficiencia total del 74.47% en condiciones óptimas. Si bien los niveles de turbidez final (18.24 NTU) permanecieron por encima de los estándares internacionales recomendados, el sistema logró una mejora significativa respecto a las condiciones iniciales, garantizando la inocuidad del agua para el consumo mediante cloración y, más importante aún, ha demostrado ser sostenible a largo plazo.

La adopción del modelo por instituciones gubernamentales como SENASA y MOPC, y su implementación exitosa en sistemas de mayor escala como el de Campo Loa, validan la replicabilidad y escalabilidad de esta tecnología. Los resultados sugieren que este sistema constituye una solución práctica y sostenible para comunidades rurales del Chaco paraguayo, contribuyendo a reducir las brechas existentes en el acceso a servicios básicos entre zonas urbanas y rurales.

Se recomienda continuar las investigaciones para seguir optimizando los parámetros de operación del sistema, particularmente en lo referente a la reducción de turbidez. No obstante, la evidencia presentada demuestra que la combinación de filtración lenta basada en la naturaleza con cloración y la gestión comunitaria efectiva puede generar soluciones viables y duraderas para el acceso a agua segura en comunidades rurales.

REFERENCIAS

Di Bernardo, L. (2004). Filtración lenta como alternativa de tratamiento de aguas para pequeñas comunidades. CINARA IRC, 1(1), 4-12.

ENOHSA. (2024). Filtración Lenta. En Fundamentaciones (Cap. VII-4). Ente Nacional de Obras Hídricas de Saneamiento. <http://www.elaguapotable.com/Filtracion%20lenta%20ENOHSA.pdf>

Giesbrecht, K., Méndez, F., & Valdez, N. (2023). Tratamiento de agua segura basado en la naturaleza en el Chaco, Paraguay. Población y Desarrollo, 30(58), 24-36. <https://revistascientificas.una.py/index.php/RE/article/view/4341>

Kearns, J. (2007). Charcoal Filtration Basics. Aqueous Solutions Technical Series, 1(1), 1-7.

MZ Ingeniería. (2024). Planta prototipo de tratamiento de agua potable ecológica: Ensayos [Informe técnico]. MZ Ingeniería S.R.L., Remansito, Paraguay.

Organización Mundial de la Salud. (2011). Guías para la calidad del agua de consumo humano: Cuarta edición que incorpora la primera adenda. OMS. <https://www.who.int/es/publications/i/item/9789241549950>

Servicio Nacional de Saneamiento Ambiental. (2024). Manual de operación, control y mantenimiento de la planta ecológica de tratamiento de agua para sistemas de macrocaptación [No publicado]. SENASA.

Servicio Nacional de Saneamiento Ambiental. (2024). Proyecto de Macrocaptación ejecutado por SENASA: El sueño del agua segura en comunidades indígenas. SENASA. <https://www.senasa.gov.py/proyecto-de-macrocaptacion-ejecutado-por-senasa-el-sueno-del-agua-segura-en-la-patria/>

Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones. (2024, julio 26). Arrancaron las pruebas finales para la entrega del sistema de Macrocaptación para la comunidad indígena de Campo Loa – Chaco Paraguayo. MOPC. <https://mopc.gov.py/arrancaron-las-pruebas-finales-para-la-entrega-del-sistema-de-macrocaptacion-para-la-comunidad-indigena-de-campo-loa>

Cutamuraja, B. (2024, agosto). Entrevista sobre sistema de tratamiento de agua basado en la naturaleza en Cucaani [Entrevista personal].

Dosapei, J. (2024, agosto). Entrevista sobre sistema de tratamiento de agua basado en la naturaleza en Guida Ichai [Entrevista personal].

Segovia, D. (2024, agosto). Entrevista sobre sistema de tratamiento de agua basado en la naturaleza en María Auxiliadora [Entrevista personal].

Cooperativa Chortitzer Ltda. (2024, agosto 20). Certificado de análisis N° 24082019: Aguas [Informe técnico]. Laboratorio del Complejo Industrial, Loma Plata, Paraguay.

Todo el contenido de **LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades**, publicados en este sitio está disponibles bajo Licencia Creative Commons .