

Análisis de viabilidad y uso seguro de aguas regeneradas y biosólidos en agricultura y restauración de suelos degradados en la cuenca del río La Villa, República de Panamá

Analysis of viability and safe use of regenerated water and biosolids in agriculture and restoration of degraded soils in the La Villa river basin of the Republic of Panama

Análise de viabilidade e uso seguro de água recuperada e biossólidos na agricultura e restauração de solos degradados na bacia do rio La Villa, República do Panamá

Valentina Opolenko¹

Centro del Agua del Trópico Húmedo para América Latina y el Caribe (CATHALAC), Panamá

Antonia Jiménez²

Universidad Pablo de Olavide (UPO) de Sevilla, España

María José Rodríguez³

Universidad Pablo de Olavide (UPO) de Sevilla, España

- 1 Doctora en Tecnología Ambiental y Gestión del Agua. Investigadora en Gestión del Agua del Centro del Agua del Trópico Húmedo para América Latina y el Caribe, CATHALAC, Edificio 111, Ciudad del Saber, Clayton, Panamá, República de Panamá. Correo electrónico: valentina.opolenko@cathalac.int ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8734-9349>.
- 2 Doctora en Biología. Profesora Titular Área de Ecología de la Universidad Pablo de Olavide, Ctra. de Utrera, 1, 41013 Sevilla, España. Correo electrónico: ajimrodr@upo.es
- 3 Doctora en biotecnología, Tecnología e ingeniería química. Investigadora de la Universidad Pablo de Olavide, Ctra. de Utrera, 1, 41013 Sevilla, España. Correo electrónico: mjferrod@upo.es



Resumen

El objetivo de la investigación realizada fue establecer las ventajas técnicas y económicas de uso de agua postratada, procedente de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) de Chitré, en riego agrícola, además de lodos como abono orgánico en cultivos y recuperación de suelos degradados. Se procedió con la instalación de las parcelas experimentales, sembradas con maíz y pasto, las cuales fueron fertilizadas con distintas dosis de biosólidos y con el agua rica en nutrientes, postratada en humedales artificiales. Entre los resultados más relevantes, destaca el aumento de la productividad del cultivo de maíz fertilizado con biosólidos, al alcanzar rendimientos comparables con los obtenidos mediante agricultura tecnificada. Además, se evidenció una mejora significativa en la calidad nutricional del forraje y en la fertilidad de suelos degradados del ecosistema de albinas, lo cual favoreció el desarrollo exitoso de especies vegetales adaptadas a estas condiciones. Estos logros permiten no solo contribuir a la seguridad alimentaria de forma sostenible, sino también impulsar la transición hacia una economía circular en la zona costera del distrito de Los Santos, en el contexto de la adaptación al cambio climático.

Palabras clave: cuenca hidrográfica; agua residual; humedal; biosólido; economía circular.



Abstract

The objective of the research carried out was to establish the technical and economic advantages of using post-treated water, from the Chitre Wastewater Treatment Plant (WWTP), in agricultural irrigation, in addition to sludge as organic fertilizer in crops and the recovery of degraded soil. The experimental plots were installed, planted with corn and grass, which were fertilized with different doses of biosolids and with nutrient-rich water, post-treated in artificial wetlands. Among the most relevant findings, the increased productivity of maize crops fertilized with biosolids stands out, reaching yields comparable to those achieved through technified agriculture. Additionally, there was a significant improvement in the nutritional quality of the forage and in the fertility of degraded soils within the albina ecosystem, which supported the successful development of plant species adapted to these conditions. These achievements not only sustainably contribute to food security but also promote the transition toward a circular economy in the coastal area of the Los Santos district, in the context of climate change adaptation.

Keywords: Hydrographic basin; wastewater; wetland; biosolid; circular economy.



Resumo

O objetivo da pesquisa realizada foi estabelecer as vantagens técnicas e econômicas do uso de água pós-tratada, proveniente da Estação de Tratamento de Águas Residuais (ETAR) de Chitré, na irrigação agrícola, além do lodo como fertilizante orgânico em cultivos e na recuperação de solos degradados. As parcelas experimentais foram instaladas, semeadas com milho e capim, fertilizados com diferentes doses de biossólidos e com água rica em nutrientes, pós-tratados em áreas úmidas artificiais. Entre os resultados mais relevantes, destaca-se o aumento da produtividade das culturas de milho fertilizadas com biossólidos, alcançando rendimentos comparáveis aos obtidos com a agricultura tecnificada. Além disso, houve uma melhoria significativa na qualidade

nutricional da forragem e na fertilidade dos solos degradados no ecossistema albina, o que favoreceu o desenvolvimento bem-sucedido de espécies vegetais adaptadas a essas condições. Essas conquistas não apenas contribuem de forma sustentável para a segurança alimentar, mas também promovem a transição para uma economia circular na área costeira do distrito de Los Santos, no contexto da adaptação às mudanças climáticas.

Palavras-chave: Bacia hidrográfica, águas residuais, zonas úmidas, biossólido, economia circular.

INTRODUCCIÓN

El agua, un recurso esencial para la vida, ha adquirido una complejidad y una problemática significativa, en especial porque la demanda global supera la disponibilidad de este recurso y, además, cuando su calidad se ve comprometida. Así, su uso está intrínsecamente relacionada con un manejo sostenible y confiable que beneficie tanto a los sectores sociales como económicos de un país o región. Es fundamental abordar estos desafíos para garantizar un acceso equitativo y sostenible al agua para las generaciones presentes y futuras (Opolenko, 2022). El cambio global afecta al agua del planeta en una diversidad de aspectos, con variaciones del ciclo hidrológico impredecibles, que hace que enfrentar los cambios provocados por el desarrollo se conviertan en un desafío extraordinario. Esto se debe a las enormes presiones, riesgos y conflictos que surgen en torno al uso de dicho recurso. En Panamá, se torna cada vez más evidente que el uso actual, así como el desarrollo y la gestión de estos recursos finitos, junto con los servicios que ofrecen, no son sostenibles (IDRC, 2019). De acuerdo con Dourojeanni (2011)

La gestión del agua siempre se lleva a cabo, no se detiene nunca, porque nada ni nadie puede desarrollarse sin este vital recurso. Se capta agua de forma legal o ilegal, de buena o mala calidad, en cantidades a veces apenas suficientes para sobrevivir, pero de alguna forma se consigue, aunque se afecte al medio ambiente o a otros usuarios, se sufra de inundaciones, sequías o contaminación, aunque se sequen los ríos o descendan los acuíferos, pero se seguirá captando agua y usándola con o sin intervención del Estado. (Dourojeanni 2011 pág. 1).

Panamá es un país que dispone de recursos hídricos relativamente abundantes, pero con una distribución geográfica no uniforme, la disponibilidad del agua contrasta con la demanda de forma desigual, debido a que las principales actividades sociales y económicas que generan estas demandas están ubicadas en zonas de ríos y acuíferos comprometidos. Este alarmante escenario de recurrentes sequías, el cambio climático, la contaminación de aguas superficiales, el agotamiento de fuentes subterráneas, junto con los volúmenes de agua para distintos usos que están en constante aumento refleja, sin excepción, la problemática en las que están inmersas prácticamente las cuencas hidrográficas del país en materia de gestión de los recursos hídricos y, en especial, las cuencas hidrográficas de la Península de Azuero en sus zonas costeras, son en las que se centra el objeto de esta investigación. Dada la problemática expuesta y el creciente déficit hídrico en la zona de estudio, se buscaron nuevas fuentes de abastecimiento, considerándose el agua residual depurada una de ellas (Opolenko y Jiménez, 2022). Aunque las aguas residuales han sido históricamente consideradas un problema a eliminar, o incluso ignoradas, esta percepción está cambiando. La creciente escasez de agua en muchas regiones ha puesto de manifiesto la importancia de recolectar, tratar y reutilizar las aguas residuales, posicionándolas como un recurso valioso en lugar de un desecho. En este contexto, Panamá enfrenta la necesidad urgente de alinearse con las tendencias globales en la gestión sostenible de los recursos hídricos. Ignorar estas oportunidades sería no solo imprudente, sino también una pérdida significativa para el desarrollo sostenible del país.

Además, el tratamiento y reutilización de aguas residuales no solo contribuyen a la conservación del agua, sino que también pueden generar beneficios económicos y medioambientales. Por ejemplo, el uso de aguas tratadas para la agricultura reduce la presión sobre las fuentes de agua dulce y disminuye la contaminación de los ecosistemas, con lo cual se crea un círculo virtuoso de sostenibilidad. Implementar políticas que fomenten la innovación y la inversión en tecnologías de tratamiento puede posicionar a Panamá como un modelo en el manejo responsable del agua en la región (ONU, 2017).

En este contexto, definitivamente no se puede menospreciar en Panamá, en la cuenca del río La Villa, perteneciente al llamado Arco Seco

de Panamá, la ventaja que ofrece el uso del agua reutilizada; por ejemplo, en la agricultura. Domingo Zarzo y M.^a Carmen García, presidente y vicepresidenta de AEDyR, destacan que el uso de tecnologías avanzadas para el tratamiento de aguas residuales permite no solo incrementar los recursos hídricos disponibles, sino también disminuir la presión sobre fuentes de agua convencionales y mitigar los efectos negativos de las descargas de aguas residuales en el medioambiente.

Es crucial subrayar que los avances tecnológicos actuales en este ámbito han alcanzado un nivel que permite producir agua regenerada con una calidad equiparable, e incluso superior a la de las fuentes de agua de origen convencional. Esto abre nuevas oportunidades para su uso en diversas aplicaciones, lo cual promueve una gestión más eficiente y sostenible de los recursos hídricos ([Interempresas, 2019](#)). El agua regenerada se posiciona actualmente como un recurso hídrico abundante, seguro y esencial desde una perspectiva sanitaria y ambiental. Su incorporación en las planificaciones hídricas presentes y futuras de cualquier país no debería ser descartada.

En el caso de Panamá, como en muchos otros países, la revolución demográfica, el éxodo rural hacia las ciudades y la creciente urbanización han generado desafíos significativos para garantizar los servicios básicos de suministro de agua potable y saneamiento que demanda la población. Estas dificultades han tenido como consecuencia un deterioro ambiental, cuya solución es compleja y costosa.

Además, el panorama de abundancia hídrica que históricamente caracterizó al país ha comenzado a ser cuestionado. Factores como el aumento de conflictos por los diversos usos del agua —impulsados por el crecimiento poblacional, el rápido desarrollo económico y la urbanización—, junto con los efectos adversos del cambio climático y el deterioro ambiental, han intensificado la presión sobre las fuentes de agua. Este contexto convierte a Panamá en un país vulnerable a la inseguridad hídrica, lo cual supone un riesgo considerable tanto para la salud de sus habitantes como para el desarrollo económico sostenible.

Es imprescindible, por tanto, que Panamá priorice la integración del agua regenerada como parte de una estrategia integral de gestión hídrica. Esto no solo aliviaría la presión sobre las fuentes tradicionales, sino que también ofrecería una solución viable y sostenible para afrontar

los desafíos presentes y futuros ([Garcimartín, 2020](#)). En este contexto, los principales retos de Panamá se concentran en cerrar las brechas de acceso al agua segura, reducir significativamente la contaminación y degradación ambiental, garantizar un saneamiento adecuado, optimizar el tratamiento y fomentar la reutilización de aguas residuales, además de intensificar las acciones de adaptación al cambio climático, entre otros desafíos.

A nivel mundial, la reutilización de agua regenerada, considerada un recurso no convencional, está emergiendo como una solución estratégica, especialmente en regiones con estrés hídrico. Esta práctica ha ganado un impulso notable gracias al creciente enfoque en la economía circular y la preocupación global por proteger los recursos hídricos. Como resultado, la reutilización de agua se ha convertido en una herramienta indispensable en la planificación hídrica, al complementar a los recursos convencionales.

La reutilización de agua implica reaprovechar el agua que previamente ha tenido un uso municipal o industrial. Para que este proceso sea viable, es esencial aplicar un tratamiento adicional al convencional, conocido como tratamiento terciario, que permite cumplir con los estándares requeridos para su vertido al medioambiente o su reutilización en aplicaciones específicas. Esto no solo optimiza la gestión de los recursos hídricos, sino que también contribuye de manera significativa a la sostenibilidad ambiental y económica ([Interempresas, 2019](#)). Las aguas regeneradas pueden definirse como aguas depuradas que han sido sometidas a un tratamiento adicional para adecuar su calidad a un uso final específico. La reutilización de estas aguas, junto con sus subproductos como los lodos, representa una oportunidad significativa para recuperar los recursos hídricos y la reducción de la contaminación. Sin embargo, esta práctica conlleva desafíos técnicos y operativos que deben cumplirse rigurosamente para garantizar su viabilidad y sostenibilidad.

Entre los principales requisitos para la reutilización de agua regenerada se encuentran: 1) Calidad adecuada: debe cumplir con los estándares específicos del uso final para garantizar su efectividad y seguridad. 2) Protección ambiental: no debe generar impactos negativos ni deteriorar los ecosistemas receptores. 3) Salud pública: es esencial que no cause daños de salud a los seres que están en contacto con el agua regenerada. 4) Sostenibilidad: debe integrarse en un marco sostenible que contemple beneficios ambientales, sociales y económicos a largo plazo.

El cumplimiento de estos requisitos no solo asegura el éxito de los proyectos de reutilización, sino que también contribuye al desarrollo de soluciones innovadoras para la gestión hídrica responsable (Seguí Amórtegui, 2004). De acuerdo con Opolenko y Jiménez (2022), para avanzar en esta dirección es imprescindible aplicar conocimientos científicos al manejo del agua, los lodos y el medioambiente. La tecnología, la investigación, la innovación y los modelos de gestión desempeñan un papel fundamental para transitar hacia una economía circular y un futuro más sostenible y eficiente.

Además, el cambio climático obliga a replantear el uso del agua regenerada, convirtiendo su gestión eficiente e integral en un pilar esencial para el desarrollo de la sociedad en el presente y en el futuro. Este enfoque no solo contribuye a mitigar los efectos adversos del cambio climático, sino que también asegura la sostenibilidad de los recursos hídricos para las generaciones venideras.

Con el objetivo de abordar la problemática de la deficiencia hídrica en la parte baja de la cuenca del río La Villa, un desafío de gran relevancia actual, se llevó a cabo con éxito el proyecto titulado “Análisis de viabilidad y uso seguro de aguas regeneradas y biosólidos en agricultura y restauración de suelos degradados en la cuenca del río La Villa”. Este proyecto lo desarrolló el equipo de investigación del Centro del Agua del Trópico Húmedo para América Latina y el Caribe (CATHALAC), en colaboración con el personal investigador de la Universidad Pablo de Olavide (UPO) de Sevilla y de la Universidad Tecnológica de Panamá (UTP).

El objetivo del proyecto ha sido contribuir a la seguridad alimentaria de la población de manera sostenible, al abordar la escasez de agua en la parte baja de la cuenca del río La Villa en el marco de la adaptación al cambio climático. Para ello, se ha promovido la reutilización de aguas residuales tratadas en el riego agrícola y el uso de lodos estabilizados como fertilizantes para cultivos, además de la restauración de suelos degradados en ecosistemas de albinas asociados a los manglares. Estas prácticas se han implementado bajo criterios de pertinencia y eficacia, pues permiten asegurar al mismo tiempo un alto nivel de protección para la salud pública y el medioambiente (UTP, 2023). Además, desarrollar una tecnología para restauración ecológica de suelos degradados de ecosistema de albinas utilizando el biosólido como abono, creando las bases de economía circular

en la zona costera del distrito de Los Santos, en contexto de adaptación al cambio climático y desarrollo sostenible.

Es muy importante resaltar que Panamá es un país conocido por su invaluable biodiversidad, incluyendo a los manglares. El ecosistema de manglar está formado por un conjunto de especies vegetales, predominantemente arbóreas, que han desarrollado adaptaciones fisiológicas, reproductivas y estructurales para prosperar en áreas inundadas y bajo la influencia constante de las mareas y el oleaje. Este ecosistema incluye no solo la vegetación característica, sino también el suelo, los canales de agua y la diversa vida silvestre que habita en su interior, adaptada a las condiciones cambiantes de las mareas más altas (Alberto, 2020). La albina es un ecosistema asociado a manglares. Son áreas costeras, susceptibles a la inundación durante períodos de nivel alto del mar, que forman lagunas por aguas del mar en terrenos bajos y arenosos, en donde la sal se queda una vez que el agua se evapora, cristalizándose y acumulándose en este tipo de suelo. Son desprovistas de vegetación o cubiertas por vegetación herbácea y arbustiva, generalmente dispersa y escasa, adaptada a los ambientes salobres, razón por lo cual el componente suelo es muy importante en este ecosistema, ya que su degradación conlleva a la pérdida total de la vegetación, lo cual afecta negativamente la estructura de los manglares, y esto causa estrés fisiológico.

El *Mapa de Cobertura Boscosa y Uso de Suelo 2021 de Panamá* (MIAMBIENTE, 2021) incluye, por primera vez, la interpretación de la categoría de tierras albinas. Aunque estas no abarcan grandes extensiones territoriales, su incorporación en la estructura del mapa representa un avance significativo en el conocimiento y manejo de este tipo de suelos.

En este contexto, y al reconocer la gran responsabilidad de la comunidad en la restauración de suelos degradados, se llevó a cabo el presente proyecto como parte de los esfuerzos de adaptación al cambio climático. Este proyecto evalúa la viabilidad del uso de biosólidos generados en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) de Chitré como fertilizante en la restauración de suelos degradados en las albinas.

El suelo, como recurso esencial para la humanidad, constituye la base principal para la producción de alimentos. Sin embargo, la degradación del suelo, según el Instituto de Innovación Agropecuaria de Panamá, representa un desafío crítico que afecta tanto la seguridad alimentaria como

la sostenibilidad ambiental (IDIAP, 2019). La degradación del suelo se define como la pérdida de su productividad y utilidad potencial, ocasionada por factores naturales o actividades humanas. Este fenómeno implica un cambio en la salud del suelo que disminuye la capacidad del ecosistema para generar bienes y prestar servicios esenciales para sus beneficiarios.

En Panamá, los problemas de deterioro del suelo son especialmente severos, debido a un proceso acumulativo y creciente de degradación que afecta a casi todos los suelos desprovistos de cobertura boscosa, lo cual repercute de forma directa en su baja productividad. Actualmente, el 28 por ciento de los suelos del país sufren algún grado de degradación, lo cual representa un desafío crítico para la economía y el desarrollo sostenible de la nación.

Los resultados de la investigación en la zona costera de los distritos de Herrera y Los Santos, según Opolenko (2022), constituyen un estudio pionero a escala local. Este trabajo busca demostrar que los lodos, como subproductos del tratamiento de aguas residuales, así como las propias aguas tratadas, poseen un alto valor y aplicabilidad para abordar problemas relacionados con la pérdida de suelos. Los impactos positivos de su utilización se evidenciarán a través del desarrollo de la investigación científica y tecnológica, la creación de capacidades y la formación de talento humano en todas las etapas del proceso.

Por su parte, las perspectivas futuras para el uso de biosólidos, de acuerdo con Orozco Lab (2023), se orientan hacia soluciones sostenibles que maximicen la eficiencia, minimicen los impactos ambientales y fomenten la economía circular. Este enfoque se refleja en la creación del Centro de Economía Circular de Panamá en el 2019. Con la ejecución de proyectos como este, se espera lograr escalabilidad e integración de enfoques de economía circular, al transformar los lodos de un residuo a un recurso valioso, promoviendo su reutilización y recuperación de valor.

Estos enfoques, a través de la capacitación y el fortalecimiento de políticas ambientales, fomentarán la investigación y el desarrollo de tecnologías más eficientes. Además, permiten la aplicación de un modelo centrado en la sostenibilidad, que no solo incrementa la productividad, sino que también impulsa economías resilientes, equitativas y mejor preparadas para enfrentar los retos del futuro.

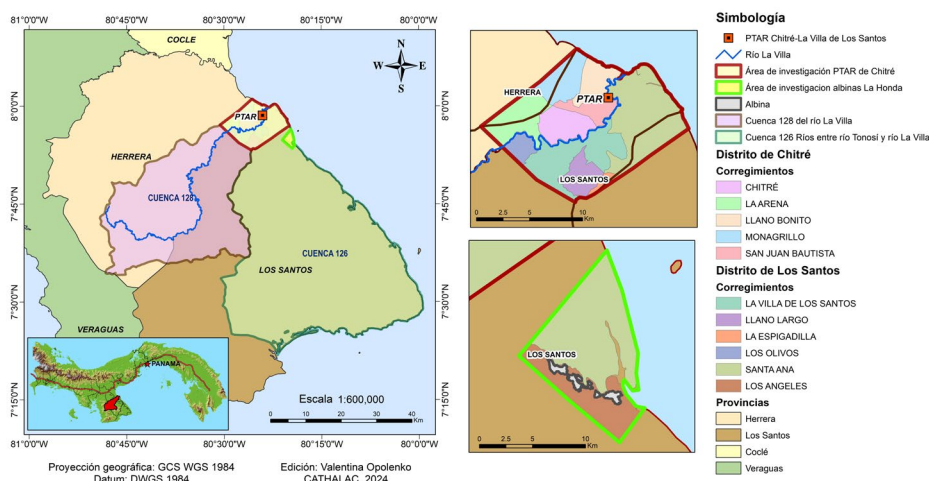
ÁREA DE ESTUDIO

La presente investigación, continuación del proyecto “Potencialidad de uso de aguas servidas para riego y recarga de acuíferos: cuenca del río La Villa, República de Panamá”, se centra en la parte baja de la cuenca hidrográfica del río La Villa (128) y en la subcuenca del río La Honda, que pertenece a la cuenca hidrográfica denominada Ríos, entre río Tonosí y río La Villa (126). Estas áreas se localizan parcialmente en las provincias de Herrera y Los Santos, en la República de Panamá.

En concreto, el estudio abarca dos zonas principales. La primera corresponde a la ubicación de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) Chitré-La Villa de Los Santos, que abarca una extensión de 160 km² y se caracteriza por una población mayoritariamente urbana. Esta zona incluye cinco corregimientos del distrito de Chitré, en la provincia de Herrera, y cinco corregimientos del distrito de Los Santos, en la provincia homónima (Opolenko, 2022).

La segunda zona, con una extensión de 10 km², se sitúa en la franja costera de los corregimientos de Santa Ana y Los Ángeles, en la provincia de Los Santos (Figura 1). Esta área forma parte del Refugio de Vida Silvestre (RVS) “El Peñón de La Honda”, un humedal de tipo marino-costero protegido (MiAmbiente, 2021).

Figura 1. Ubicación regional y división administrativa del área de estudio



Fuente: elaboración propia.

La delimitación de ambas áreas de estudio consideró criterios ecosistémicos y socioeconómicos, ya que estas zonas enfrentan condiciones cada vez más severas de sequía estacional. La disponibilidad de recursos hídricos para diversos usos se reduce anualmente debido a factores como la alta concentración de población, la degradación de suelos y el aumento significativo de las actividades agropecuarias. Como resultado, algunos corregimientos se incluyeron solo de manera parcial, considerando su división territorial administrativa (Opolenko, 2022).

Características generales

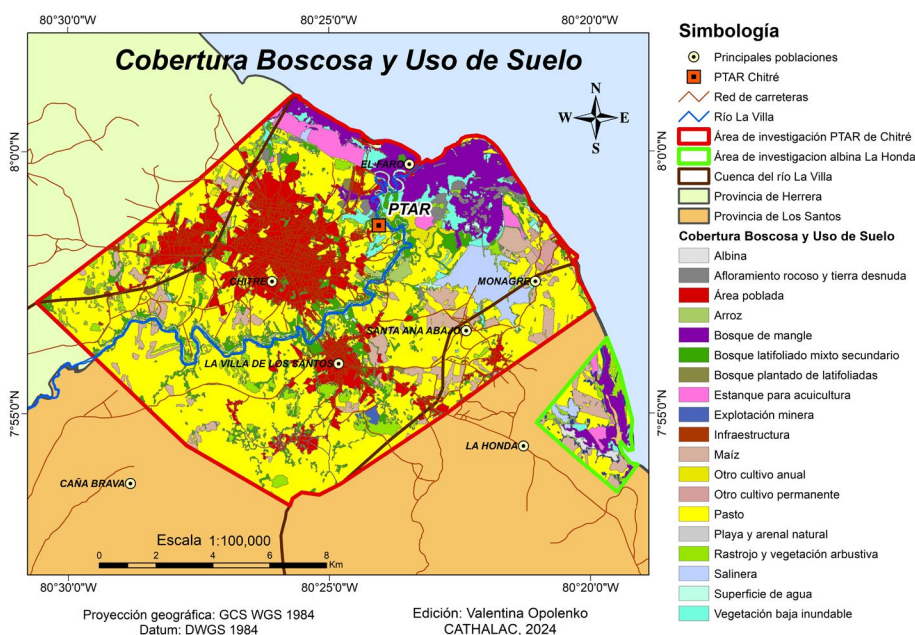
La zona de investigación está ubicada en la vertiente del Pacífico de la Península de Azuero, abarca las provincias de Herrera y Los Santos. Se encuentra aproximadamente a 250 km al suroeste de la ciudad de Panamá, la capital de la República de Panamá (Opolenko, 2015). El relieve de la zona estudiada, que corresponde a áreas costeras, se caracteriza por un extenso sector de tierras bajas (llanuras) y por colinas suaves y aisladas, con una elevación media de aproximadamente 25 m s. n. m. Estos alineamientos presentan signos de procesos avanzados de erosión y los efectos degradantes de las actividades agropecuarias (Opolenko, 2022). Desde una perspectiva geomorfológica, como se indica en el Mapa 4.1 de *Regiones Morfoestructurales de Panamá* (IGNTG, 2007), la zona de estudio se clasifica dentro de la unidad conocida como *Regiones Bajas y Planicies Litorales*, que abarca áreas deprimidas formadas por rocas sedimentarias marinas. La topografía varía de aplanada a ligeramente ondulada, con pendientes que oscilan entre muy débiles y débiles. El relieve residual, que incluye colinas aisladas y diques, contribuye a la irregularidad del paisaje en esta unidad. Específicamente, se ubica al este de la cuenca del río La Villa, donde se extienden amplias planicies y valles atravesados por ríos y quebradas de curso meándrico. En esta región, se destacan los manglares y las albinas a lo largo de la franja costera, así como los bajos inundables, pantanos, terrenos cultivados y áreas pobladas (Opolenko, 2022).

Con respecto a la cobertura boscosa y el uso actual del suelo en el área de investigación, según el *Mapa de Cobertura Boscosa y Uso de Suelo* (MIAMBIENTE, 2021), en la parte baja de la cuenca del río La Villa, que abarca 160 km², predomina el uso agropecuario, el cual representa

el 56.1 % de la superficie total del área de estudio. De este porcentaje, el 49.2 % corresponde a áreas cubiertas por pasto y el 5.3 % a terrenos destinados al cultivo de maíz. Solo el 8.1 % de la superficie está ocupada por bosques secundarios y el 6.3 % por manglares. Estas áreas boscosas están, en su mayoría, rodeadas por rastrojo y vegetación arbustiva, que parecen funcionar como zonas de amortiguamiento o transición entre la cobertura boscosa y las actividades agropecuarias (Opolenko, 2022).

Por otro lado, en la zona costera de la subcuenca del río La Honda, que comprende aproximadamente 10 km², el uso agropecuario del suelo representa el 44.6 %. De este total, el 27.7 % corresponde a áreas cubiertas por pasto y el 16.8 % a cultivos de maíz. Los bosques de mangle ocupan un 21.5 % del área, seguidos por los bosques secundarios con un 5.9 %. Además, el ecosistema de albinas cubre el 4.0 % de esta zona de estudio (Figura 2).

Figura 2. Cobertura boscosa y principal uso de suelo en las zonas de investigación



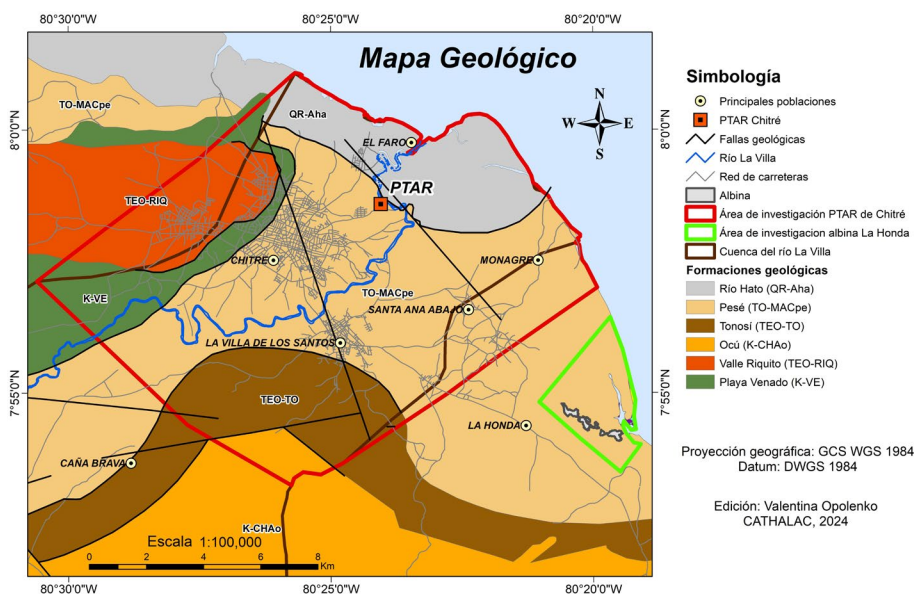
Fuente: elaboración propia.

Entretanto, conforme con la taxonomía de suelos de la *Base Referencial Mundial del Recurso Suelo* (WRB, 2015), los suelos identificados en el área de investigación se clasifican como *Nitisols umbrico* (NTum) y pertenecen al grupo de suelos regulados por la química de Fe/Al (IDIAP, 2016). Se trata de suelos tropicales rojos, profundos y bien drenados, caracterizados por límites de horizontes difusos y un horizonte subsuperficial con un contenido mínimo del 30 % de arcilla. Estos suelos están presentes en la zona de estudio, principalmente en áreas planas y onduladas, asociadas a geoformas como valles con terrazas, llanuras y pequeñas colinas. Su desarrollo ocurre sobre una amplia variedad de materiales parentales sedimentarios (Opolenko, 2022).

El marco geológico de la parte baja de la cuenca del río La Villa y de la subcuenca del río La Honda, donde se encuentra el área de investigación, se caracteriza por un entorno complejo debido a su evolución histórica. Esta región pasó de ser un pequeño arco de islas y mares poco profundos a un istmo influenciado por intensa actividad volcánica, acompañada de emersiones, regresiones y movimientos tectónicos multidireccionales, así como de procesos de erosión y sedimentación en el plano horizontal.

El conjunto litológico del área de estudio, según el *Mapa Geológico de la República de Panamá* a escala 1:250,000 (Opolenko, 2015), incluye rocas de origen ígneo (plutónicas y volcánicas) y sedimentario, relacionadas con la actividad volcánica de la península de Azuero (Figura 3).

Figura 3. Mapa geológico del área de investigación



Fuente: elaboración propia.

La historia geológica de la zona investigada se caracteriza por la formación de capas alternas de rocas sedimentarias e ígneas, tanto intrusivas como efusivas. Posteriormente, estas estructuras fueron transformadas por levantamientos y movimientos tectónicos, acompañados de fallas regionales significativas, que definieron su configuración actual (Opolenko, 2022).

MATERIALES Y MÉTODOS

Para alcanzar los objetivos planteados en la presente investigación, se utilizó un enfoque de investigación científica aplicada, también conocida como investigación práctica o empírica, dado que sus resultados pueden tener una aplicación inmediata en la solución de problemas específicos del área de estudio (Cabezas Mejía et al., 2018). Según Neill y Cortez Suárez (2018), este tipo de investigación se caracteriza por su orientación hacia fines prácticos, aunque mantiene una estrecha relación con la investigación básica, pues los resultados teóricos contribuyen al desarrollo de aplicaciones concretas. En este contexto, la prioridad de la investigación radica en los efectos prácticos que genera el estudio.

En cuanto a los métodos empleados para la recolección de datos, esta investigación se clasifica como de campo o *in situ*, ya que se obtuvieron nuevos conocimientos directamente en el lugar donde ocurren los fenómenos objeto de estudio. Estas actividades se llevaron a cabo en la parte baja de la cuenca del río La Villa y en la subcuenca del río La Honda.

Además, de acuerdo con la dimensión temporal del seguimiento de las variables, esta investigación es de tipo longitudinal, pues contempla el monitoreo continuo de las muestras a lo largo del tiempo. Por ejemplo, se analizará la calidad del agua postratada destinada al riego, el crecimiento de las plantas en parcelas experimentales tras la aplicación de lodos provenientes de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) como abono, entre otros aspectos. Este enfoque implica la realización de múltiples observaciones o mediciones con el fin de evaluar la evolución de los eventos bajo estudio (Neill y Cortez Suárez, 2018).

La metodología aplicada en esta investigación busca generar resultados concretos y relevantes, que no solo permitan comprender mejor los fenómenos estudiados, sino también ofrecer soluciones prácticas para optimizar el uso de recursos hídricos en la región.

Basándose en resultados obtenidos, en el presente estudio “Análisis de viabilidad y uso seguro de aguas regeneradas y biosólido en agricultura y restauración de suelos degradados en la cuenca del río La Villa”, fueron tomados en consideración los logros alcanzados en el proyecto previo, y se utilizó, con el fin de darle continuidad, el mismo tipo de métodos y técnicas de investigación. La metodología utilizada se fundamentó en un análisis multidisciplinario basado en un diagnóstico biofísico y socioeconómico, debido a la complejidad de los numerosos factores involucrados. Según Opolenko (2022), el enfoque socio ecosistémico, que considera a los seres humanos, la naturaleza y los vínculos entre ambos, le permitió al equipo investigador completar exitosamente el proyecto mencionado. Este enfoque también abrió el camino para el desarrollo de una nueva línea de investigación relacionada.

Para efectos del desarrollo de la investigación, su ejecución tuvo varias fases, tales como el análisis e inventario de la información previamente generada, la fase experimental con monitoreo establecido y el desarrollo de los distintos procedimientos de investigación. Así, el desarrollo metodológico comprendió el análisis de técnicas y procedimientos que

permitieron evaluar la viabilidad de implementar de manera segura soluciones tecnológicas en el área de estudio. Estas soluciones se enfocaron en el reúso de aguas residuales postratadas y de lodos, al considerar estos productos como una alternativa viable y promover un cambio de paradigma en el que se reconoce el valor de las aguas y los biosólidos dentro de una economía circular.

Entre los métodos no convencionales propuestos destaca la reutilización directa de aguas depuradas en humedales artificiales para riego agrícola (Opolenko, 2022) y el uso de lodos estabilizados o biosólidos para generar abonos orgánicos. Estos abonos pueden ser utilizados tanto en la agricultura como en la restauración de suelos degradados, específicamente de albinas asociadas al ecosistema de manglares presentes en el área de investigación. La disponibilidad de volúmenes adecuados de agua y lodos como materia prima está garantizada por el funcionamiento de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) ubicada en la ciudad de Chitré, provincia de Herrera. Esta moderna instalación, la primera de su tipo en el interior del país, tiene una capacidad de recolección y tratamiento de 7 millones de galones diarios (26,500 m³/día), con posibilidad de ampliación futura a 11 millones de galones diarios (41,635 m³/día).

Con un tratamiento adecuado y su posterior recuperación mediante procesos naturales, tanto las aguas postratadas como los lodos pueden ser aprovechados como recursos alternativos. Las aguas pueden ser empleadas para riego agrícola, mientras que los biosólidos pueden sustituir fertilizantes químicos, con lo cual se reducen costos y se aportan nutrientes al suelo. Estas prácticas representan un recurso estratégico en zonas con déficit hídrico, como la península de Azuero, especialmente durante la estación seca. Además, la adopción de estas técnicas podría beneficiar al sector agrícola nacional al disminuir los costos de producción mediante el uso de nutrientes presentes en el agua de riego y en los biosólidos.

Además, los lodos producidos en la PTAR, tradicionalmente considerados un problema ambiental, se están reevaluando bajo un nuevo enfoque que reconoce su potencial como recursos valiosos en una economía verde. Este paradigma, que promueve la transformación de residuos en recursos, destaca por su sostenibilidad y su capacidad de generar beneficios ambientales, sociales y económicos. Los lodos, ricos en nutrientes y materia orgánica, pueden ser transformados en abonos

orgánicos para mejorar suelos degradados, al promover un desarrollo ecosistémico sostenible en la región ([Saravia Matus, 2022](#)).

Finalmente, la circularidad en el manejo de estos recursos permite gestionar de manera más eficiente los insumos disponibles, reducir la dependencia de recursos finitos y fomentar la resiliencia frente a desafíos como el cambio climático y la pérdida de biodiversidad. Este enfoque está alineado con una transición hacia una economía verde, que prioriza la productividad sostenible y la regeneración de los ecosistemas.

De este modo, a través de la utilización controlada y estudiada de aguas postratadas y lodos estabilizados provenientes de la PTAR, se busca generar beneficios agronómicos, económicos y ambientales para quienes habitan la región. Al incorporar el agua postratada, rica en nutrientes, en el riego agrícola durante la estación seca y aplicar biosólidos para mejorar la calidad del suelo en las áreas costeras, se contribuye a la restauración de la vegetación y la creación de hábitats para diversas especies.

Otro aspecto relevante, abordado en la presente investigación, es la viabilidad y aplicación segura de lodos estabilizados de la PTAR como abonos en la recuperación de suelos deteriorados, debido a que a pesar de los beneficios que pueden ofrecer los lodos estabilizados, los mismos deben ser inocuos y cumplir por completo con la normativa nacional vigente. Es muy importante caracterizarlos antes de ser empleados, teniendo en cuenta las particularidades del suelo a restaurar y el entorno en donde se encuentra; solo así se garantizará obtener el máximo beneficio del biosólido y prevenir riesgos al medioambiente y a la salud y el bienestar humano ([Opolenko, 2015](#)). Por lo tanto, es necesario realizar investigación previa a la aplicación de biosólidos en campo para un determinado uso, porque los efectos que se produzcan dependerán de factores tales como el clima, el tipo de suelo, la calidad de los biosólidos y el manejo agrícola ([González-Flores et al., 2017](#)).

Fase experimental # 1, PTAR Chitré-La Villa de Los Santos

Con el fin de ampliar y profundizar los alcances del estudio previo, así como para poder cumplir con los objetivos planteados en la presente investigación, se instalaron en los predios de la PTAR de Chitré las parcelas experimentales (Figura 4).

Figura 4. Ubicación parcelas experimentales en PTAR



Fuente: elaboración propia.

Estas parcelas fueron sembradas con maíz (*Zea mays*), comercializada como Pionner 30F35, por ser el cultivo mayoritario en el área de estudio y también con una variedad de pasto cuyo nombre común es Alicia (*Cynodon nlemfuensis*), que también es de las especies de pastos y forrajes más importantes y típicos de la parte baja de la cuenca. En la selección se consideró su productividad, valor nutritivo y adaptación al área de estudio (Opolenko, 2022). Como fuente de agua para riego de parcelas, según el esquema del experimento, se utilizaron los efluentes de la PTAR y también el agua potable. Las aguas residuales ingresan a la PTAR, donde reciben un tratamiento convencional compuesto por procesos físico-químicos (cribado, sedimentación y tratamiento biológico), tras lo cual son sometidas a un tratamiento terciario mediante humedales artificiales plantados con *Brachiaria arrecta* (pasto Tanner), que optimiza aún más la calidad del efluente.

Para la generación de agua postratada rica en nutrientes, que se aplicó en el riego de parcelas de uno de los tratamientos, se instalaron dos unidades de humedales artificiales, cuyas estructuras han sido construidas

en el proyecto anterior. Estas fueron sembradas con el pasto Tanner que ya demostró su capacidad en materia de eliminación de contaminantes y mejoras de la calidad de los efluentes de la PTAR, al aplicar un tiempo de retención hidráulico en los módulos de 24 horas (Figura 5). El agua previamente tratada se aplicó de forma directa al suelo (riego por gravedad), sin contacto con las partes comestibles de la planta, lo cual es una medida recomendada por la [FAO/OMS \(2010\)](#) y la [OMS \(2006\)](#) para reducir riesgos microbiológicos.

Figura 5. Humedales artificiales de afino, pasto Tanner. Generación de agua postratada para riego con nutrientes



Fuente: elaboración propia.

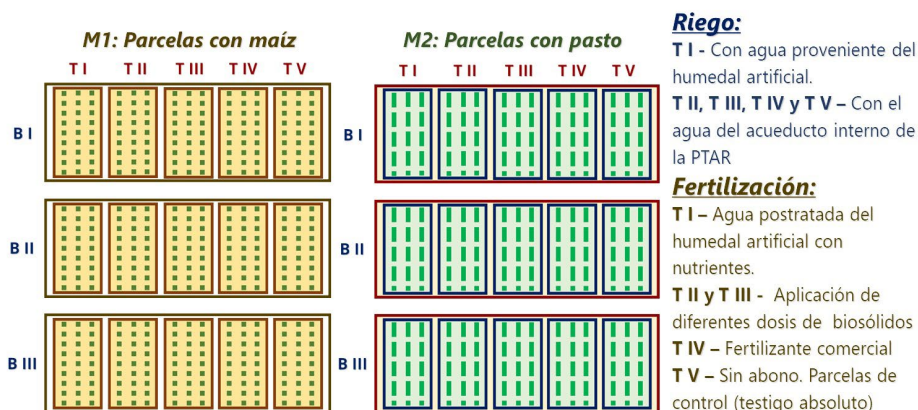
Además de las aguas postratadas en humedales artificiales, para el riego en parcelas experimentales se utilizó el agua del acueducto interno de la PTAR, en las cuales se les aplicó como abono el lodo optimizado o biosólido, que es un subproducto derivado de los propios tratamientos de las aguas residuales, rico en materia orgánica y nutrientes ([Cruz, 2015](#)). Previo a su aplicación, los lodos fueron sometidos a un proceso de estabilización y secado solar en las instalaciones de la PTAR, lo cual facilitó reducir su contenido de humedad y asegurar su inocuidad, pues el secado solar de lodos en climas cálidos y soleados puede reducir los niveles de *E. coli* y helmintos hasta niveles aceptables para su uso agrícola (Carr et al., 2004). Posteriormente, fueron caracterizados según normativa nacional, mediante análisis de metales pesados, contenido de materia orgánica, fósforo y nitrógeno; esto permitió establecer dosis adecuadas y

seguras para los tratamientos experimentales. En Panamá, el uso agrícola de aguas residuales y biosólidos está regulado por normativas nacionales que exigen la caracterización previa de ambos insumos, así como el cumplimiento de parámetros de calidad para garantizar la salud pública y la protección ambiental.

Para poder documentar y analizar la experiencia de utilización del agua regenerada y de lodos en los cultivos seleccionados, se realizó el diseño experimental denominado “bloques completos al azar” (Castro et al., 2022). Este diseño permite una comparación adecuada de los tratamientos al controlar las variables que podrían influir en el resultado y no son objeto de estudio, lo cual mejora la precisión de las conclusiones. Se realizaron tres repeticiones y cinco tipos de tratamientos.

Para ello, se instalaron 30 parcelas experimentales de 3 m de largo por 1,5 m de ancho, con separación de 1 m entre parcelas y bloques (B); 15 parcelas del primer módulo (M1) fueron sembradas con maíz *Pionner 30F35* y otras 15 del segundo módulo (M2) con pasto mejorado *Cynodon nlemfuensis*, cuyo nombre común es pasto Alicia. Cada módulo contó con tres bloques o repeticiones (BI, BII y BIII) y a cada uno, con la vegetación sembrada, se le aplicaron cinco tipos de tratamiento (T1, T2, T3, T4 y T5) (UTP, 2023). Uno de los factores principales de esta investigación ha sido la calidad del agua de riego y su interacción con el suelo, además de la aplicación de los biosólidos y abonos químicos. Por lo tanto, los tratamientos experimentales de cada bloque fueron constituidos de la siguiente manera: en las parcelas de T1, los riegos fueron realizados con agua de la PTAR, postratada en humedal artificial, como fuente de nutrientes; en las parcelas de T2, T3, T4 y T5 han sido regadas individualmente con agua tomada del acueducto, para evitar posibles interferencias con el T1, con adición de diferentes dosis de biosólidos como abono (T2 y T3) y fertilizante comercial (T4). El último tratamiento, T5, sirvió de control (testigo absoluto), sin aplicación de ningún tipo de abono (Figura 6).

Figura 6. Diseño de los módulos experimentales y tipos de tratamientos aplicados



Fuente: elaboración propia.

Previo al inicio de los experimentos se realizó un estudio del suelo que estableció el estado nutricional inicial en las distintas parcelas. Así mismo, se determinaron las dosis necesarias de abono orgánico (lodos) que fueron aplicados en los tratamientos T2 y T3 y del abono químico comercial (NPK 10-26-26), en T4. Con este propósito se realizó el muestreo y análisis del suelo que conformó las parcelas experimentales, así como del lodo que se aplicó como abono orgánico o biosólido en los tratamientos T2 y T3 de ambos módulos experimentales (M1 y M2). Todos los procedimientos realizados del riego, de la aplicación del abono orgánico y la fertilización mineral cumplieron estrictamente con los requisitos establecidos por la reglamentación panameña referente al uso agrícola de lodos de depuradora.

La siembra del maíz se realizó el 5 de marzo del 2023 en Módulo 1 (M1) y se procedió con su primera fertilización nueve días después de la siembra, a razón de 3/4 de libra por parcela de abono comercial para el tratamiento T4, aplicado a cada uno de los tallos de maíz. Para el caso de aplicación de biosólidos, se utilizó 3 libras en cada parcela para el tratamiento T2 y 5 libras para el T3, en ambos casos repartidos en forma de unas hileras entre las plantas de maíz. A partir de esta primera fertilización, se continuó con la incorporación de sólidos cada 15 días. Para el caso del T1, como aporte de nutrientes se optó por regar 3 veces a la semana a

razón de 18 litros de agua por parcela, procedentes del humedal artificial. Con respecto al Módulo 2, el pasto mejorado Alicia, que se sembró unas semanas antes que el maíz (16/02/2023), fue fertilizado el 8/03/2023. Para el tratamiento T1 se optó por regar 3 veces a la semana a razón de 30 litros de agua del humedal por parcela. Para el T2 se aplicó 3 libras de biosólidos, para el T3 fueron 5 libras de biosólidos, en ambos casos distribuidos uniformemente. Para el T4 se aplicó una (1) libra de abono comercial por parcela (Figura 7).

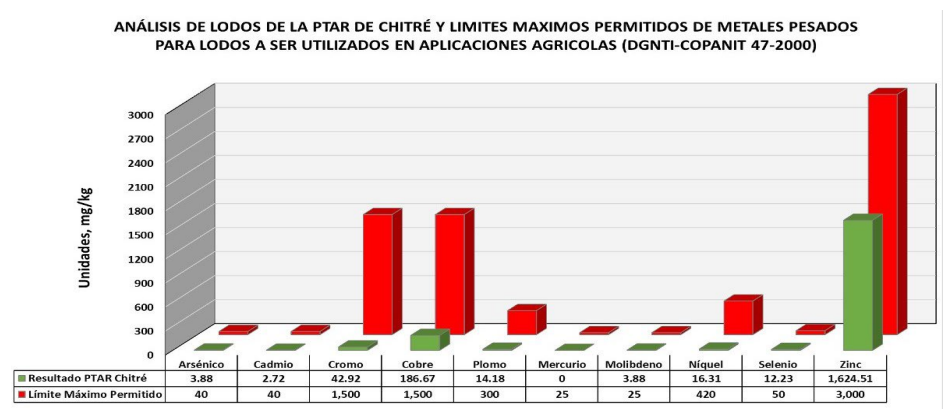
Figura 7. Parcelas experimentales sembradas con maíz (M1) y pasto (M2)



Fuente: elaboración propia.

Para obtener los resultados tangibles en la investigación, se realizaron diferentes análisis de los cultivos involucrados, tales como análisis bromatológico, foliares y de metales pesados (Figura 8).

Figura 8. Análisis de metales pesados de lodos de la PTAR



Fuente: elaboración propia.

Igualmente, los análisis de la calidad fisicoquímica de agua de riego y suelo, así como de lodos generados en la PTAR, todo esto con fines de evaluación de la compatibilidad bioquímica y de las interacciones físicas con el medio, lo cual permitió interpretar los parámetros obtenidos en función de la caracterización del suelo, el manejo del agua, el tipo de sistema de riego y la elección de la especie cultivada.

- *Resultados obtenidos en parcelas experimentales con maíz*

Transcurridas 12 semanas desde la siembra, se realizó la cosecha del maíz en las parcelas experimentales. Se tomaron las muestras de tallo, hojas y granos para análisis bromatológicos, foliares y de metales pesados (Figura 9 y Tabla 1):

Figura 9. Producción de maíz en grano en parcelas experimentales



Fuente: elaboración propia.

Tabla 1. Rendimientos de maíz en grano por cada tratamiento

Tratamiento	Largo (cm)	Hileras, promedio	Granos/hilera	Total, de granos/mazorca	Peso (gramos)	Circunferencia (cm)
T1 maíz grano	16.33	18.33	29.00	531.67	233.33	16.00
T2 maíz grano	18.00	17.67	34.33	570.00	232.00	15.00
T3 maíz grano	15.33	16.00	26.00	416.00	193.67	15.00
T4 maíz grano	11.00	0.00	11.33	0.00	75.33	11.00
T5 maíz grano	17.00	16.67	32.00	530.00	248.00	16.00

Fuente: elaboración propia.

Al realizar una comparativa de los diferentes tratamientos evaluados (Tabla 1), se puede enunciar que el T2 (biosólidos) fue el que mejor resultado aportó, muy seguido del T1 (agua de humedal con nutrientes). Cabe destacar que una mazorca de maíz puede tener de 300 a 1000 granos; haciendo pensar que este ensayo ha estado promediando datos comúnmente obtenidos a través de una agricultura tecnificada. Es importante resaltar que para el T1 solo se utilizó agua de humedal artificial, para el T2 y T3 biosólidos; estos tratamientos con dosis distintas, una más elevada que la otra, respectivamente, T4 abono químico y el T5 que no se le aplicó nada. Mientras tanto, al examinar los resultados de análisis bromatológico del tallo de maíz, con hojas y mazorcas, de los cinco tratamientos, se pudo establecer lo siguiente (Tabla 2):

Tabla 2. Análisis bromatológico del maíz fresco

Tratamiento	% Proteína en materia seca (MS)	% Fibra Detergente Ácido (FDA)	% Cenizas	% Fósforo	% Calcio	Lecha, Litros/ Tn de MS
T1 maíz fresco	11.9	29.1	6.82	0.30	0.40	1,388
T2 maíz fresco	10.2	30.1	5.47	0.30	0.39	1,492
T3 maíz fresco	12.1	32.9	6.72	0.29	0.30	1,327
T4 maíz fresco	9.1	30.3	7.99	0.22	0.44	1,109
T5 maíz fresco	8.8	29.3	6.72	0.20	0.31	1,102

Fuente: elaboración propia.

- El tratamiento T3 arroja los mejores resultados respecto a los contenidos de proteína en materia seca (MS) con un 12.1 %, un FDA (Fibra Detergente Ácido) de un 32.9 %, cenizas del 6.72 %, donde cabe destacar la relación fósforo (0.29 %) calcio (0.30 %). Cabe mencionar que el tratamiento T3, fue al que mayor cantidad de biosólidos se le incorporó semanalmente.
- Muy seguido del tratamiento T1 con un porcentaje de proteína en materia seca del 11.9 %, un FDA del 29.1 %, cenizas del 6.82 %, la relación fósforo (0.30 %) y calcio (0.40 %).
- El tratamiento T2 presenta resultados similares al T1, con un porcentaje de proteína en materia seca del 10.2 %, un FDA del 30.1 %, cenizas del 5.47 %, donde la relación fósforo (0.30 %) y calcio (0.39 %) es casi parecida.
- El tratamiento T4 fue con los resultados más bajos al momento de compararlo con el testigo T5, en donde su porcentaje de proteína en materia seca es del 9.1 %, su FDA es del 30.3 %, cenizas del 7.99 % y una relación fósforo-calcio del 0.22 % y del 0.44 % respectivamente.

Con respecto a la producción de leche, se considera que, para condiciones de campo normales, conseguir entre 1,000 a 1,200 litros de leche/Tn MS consumida, es una buena meta. En el caso concreto de las parcelas experimentales, según los resultados obtenidos (Tabla 2), el tratamiento T2 tuvo la mayor producción de leche por cada kg de materia seca (MS) consumida, de 1,492 Litros/Tn MS, seguido por el T1, con una producción de 1,388 Litros/Tn MS, lo cual supera los promedios establecidos.

Además de los análisis bromatológicos, a la planta de maíz (hoja y tallo) y fruto (grano y mazorca), se realizaron los análisis de metales pesados. Los compuestos analizados dentro de la muestra de cada uno de los cinco tratamientos fueron *arsénico, cadmio, cobre, cromo, manganeso, molibdeno, níquel, plomo, selenio y zinc*. Los valores medios obtenidos en los análisis indicaron que no se observó la absorción anómala de metales en plantas de maíz y granos, lo cual dio como resultado los niveles aceptables y permitidos por la normativa nacional.

- **Resultados obtenidos en parcelas experimentales con pasto**

Para la fase experimental del pasto, los cinco tratamientos (T1 al T5) se aplicaron a la variedad de pasto que crece en áreas verdes de la PTAR, pues está adaptado a la zona donde se localiza el proyecto. Para este fin se procedió con la limpieza previa de todas las parcelas establecidas y el 16 de febrero del 2023 se realizó la siembra del pasto nativo *Cynodon nlemfuensis*, cuyo nombre común es pasto Alicia. Se definió un programa de fertilización, en donde al tratamiento T1 se le suministró 324 litros de agua de humedal artificial por semana.

Para el tratamiento T2 se incorporaron 9 libras para la primera y cuarta semana, totalizando 18 libras incorporadas para este tratamiento (3 libras por parcela). En tanto al tratamiento T3, se incorporaron 15 libras para la primera semana y cuarta semana, para un total de 30 libras incorporadas en este período (5 libras por parcela). En el tratamiento T4 se utilizaron 3 libras de fertilizante químico para la primera y cuarta semana distribuidas uniformemente en cada parcela. Para el tratamiento 5 (T5) no se aplicó nada, por considerarse un “blanco”.

Sin embargo, en el caso concreto del experimento realizado, a 60 días después de la siembra, la altura promedio del pasto entre 15 parcelas, fue de 35 cm. Por lo tanto, el primer corte se realizó el 2/04/2023. A las muestras de pasto, correspondientes a cada tratamiento, se realizaron los análisis bromatológicos, dando como resultado lo siguiente (Tabla 3):

Tabla 3. Análisis bromatológico del pasto

Tratamiento	% Proteína en materia seca (MS)	% Fibra detergente ácido (FDA)	% Cenizas	% Fósforo	% Calcio	Lecha, Litros/ Ton de MS
T1 pasto	8.7	34.2	8.35	0.13	0.26	1,309
T2 pasto	11.0	35.1	7.71	0.23	0.15	1,216
T3 pasto	11.2	30.5	6.31	0.22	0.16	1,503
T4 pasto	11.7	35.7	9.03	0.24	0.33	1,288
T5 pasto	11.2	32.4	8.84	0.25	0.54	1,315

Fuente: elaboración propia.

- El mejor resultado lo obtuvo el tratamiento T4 con un porcentaje proteína en materia seca del 11.7 %, un FDA del 35.7 %, cenizas del 9.03 %, fósforo con un 0.24 % y calcio con un 0.33 %.
- Con resultados muy similares se encuentran los tratamientos T3 y T5, con un porcentaje de proteína en materia seca de 11.2 % para ambos casos, con FDA del 30.5 % (T3) y del 32.4 % (T5), cenizas del 6.31 % (T3) y del 8.84 % (T4), los porcentajes de fósforo se mantuvieron muy parecidos con un 0.22 % (T3) y un 0.25 % (T5), muy por el contrario, donde los porcentajes de calcio si variaron con un 0.16 % (T3) y un 0.54 % (T5).
- El tratamiento T2 arrojó resultados parecidos al T3, T4, T5, Proteína del 11 %, FDA del 35.1 %, cenizas del 7.71 %, fósforo del 0.23 % y calcio del 0.15 %.
- El T1 presentó los resultados más bajos al momento de compararlo con el testigo (T5), proteína del 8.7 %, FDA del 34.2 %, cenizas del 8.35 %, fósforo del 0.13 % y calcio del 0.26 %.

Es importante resaltar que, según los resultados obtenidos (Tabla 3), el tratamiento T3 tuvo la mayor producción de lecha por cada kg de materia seca (MS) consumida: 1,503 Litros/Tn MS, lo cual se puede explicar, así como en las parcelas experimentales de maíz, por la mejor calidad del forraje producido, debido a la aplicación de biosólidos.

Fase experimental # 2, Albinas La Honda de Los Santos

Además de la fase experimental que comprendió la instalación de parcelas con pasto mejorado y maíz en el área de la PTAR Chitré-La Villa de Los Santos, se realizaron experimentos en los cuales se investigó el proceso de recuperación de suelos degradados con la aplicación de biosólidos, provenientes del tratamiento de aguas residuales. Se evaluó la posibilidad de restauración de suelos degradados de ecosistema de albinas, localizadas en la zona costera del corregimiento de Los Ángeles de la provincia de Los Santos.

Para la preparación del sustrato experimental, en una zona de albinas fue extraído el suelo, que luego se trasladó hacia el área del vivero. Este

suelo degradado de albinas fue combinado con biosólido, transportado previamente de la PTAR (Figura 10).

Figura 10. Localización del sitio de extracción de suelos degradados, albina La Honda



Fuente: elaboración propia.

Para poder realizar la siembra de semillas de mangle, en el vivero ubicado en la comunidad La Honda se instalaron 20 cajas experimentales o cajas pioneras de madera con las siguientes dimensiones: 40 cm x 20 cm y 30 cm de altura, las cuales fueron llenadas con diferentes combinaciones de sustrato, según el diseño estadístico de seguimiento. En el sustrato de estas cajas fueron sembrados los propágulos de mangle rojo (*Rhizophora mangle*), de mangle salado (*Avicennia bicolor*) de un ecosistema de manglar local y una especie asociada herbácea la verdolaga (*Sesuvium portulacastrum*), que se desarrolla por lo general en sustratos costeros arenosos. De esta manera, fueron cuatro tratamientos o mezclas con diferentes proporciones entre el biosólido y suelo de albina extraído del área de investigación, para obtener respectivos sustratos:

- Tratamiento 1 (T1) - “Blanco” o de control (suelo de albina sin biosólido)
- Tratamiento 2 (T2) - 1 parte de biosólido (25 %) y 3 partes de suelo (75 %)
- Tratamiento 3 (T3) - 1 parte de biosólido (50 %) y 1 parte de suelo (50 %)
- Tratamiento 4 (T4) - 3 partes de biosólido (75 %) y 1 parte de suelo (25 %)

Cabe mencionar que cada tratamiento tuvo cinco repeticiones, pues el mayor número de repeticiones sirve para tener mayor variabilidad en el análisis de datos y la reducción de incertidumbre. A los sustratos obtenidos de cada tratamiento se realizaron análisis de los siguientes parámetros (Tabla 4).

Tabla 4. Características químicas de sustratos por cada tratamiento (5/07/2023)

	pH	% M. O.	P mg/l	K mg/l	Ca cmol/kg	Mg cmol/kg	Al mg/l	Mn mg/l	Fe mg/l	Zn mg/l	Cu mg/l
T1	7.80 L.AL	0.00 Bajo	26.00 Medio	448.9 Alto	1.20 Bajo	9.40 Alto	0.20 Medio	24.70 Medio	255.7 Alto	0.80 Bajo	0.50 Bajo
T2	7.10 L.AL	0.51 Bajo	46.00 Medio	465.0 Alto	3.90 Medio	6.00 Alto	0.90 Medio	47.30 Medio	353.3 Alto	14.10 Alto	1.20 Bajo
T3	7.20 L.AL	0.86 Bajo	180.0 Alto	512.9 Alto	4.00 Medio	6.60 Alto	0.80 Medio	105.2 Alto	374.5 Alto	85.90 Alto	2.50 Medio
T4	6.90 P.AC	2.0 Bajo	288.0 Alto	493.6 Alto	5.40 Alto	4.70 Alto	1.00 Medio	105.4 Alto	422.0 Alto	126.3 Alto	3.50 Medio

Códigos del pH: L.AL = Ligeramente alcalino; P.AC = Poco ácido

Fuente: elaboración propia.

En los resultados del *Laboratorio de Suelos del Instituto de Innovación Agropecuaria de Panamá (IDIAP)*, se puede observar como cambia el contenido de nutrientes en el suelo degradado de la albina (T1) y aumenta su fertilidad con la aplicación de distintas dosis de biosólidos (T2, T3 y T4), según el diseño establecido. El tratamiento T4 mostró un pH de

6.90, lo cual lo sitúa en el rango de acidez donde tanto el Al como el Mn se vuelven más solubles y, por ende, potencialmente tóxicos para muchas especies vegetales sensibles.

Según la [FAO \(2006\)](#) y la [US EPA \(1994\)](#), la solubilidad del Al y Mn aumenta notablemente en suelos con $\text{pH} < 6.5$, y su toxicidad puede afectar el desarrollo radicular y la absorción de otros nutrientes. En particular, la toxicidad por Mn se manifiesta en valores de pH cercanos a 6.0-6.8 cuando las concentraciones superan los 300 mg/kg, como se observó en T3 (374.5 mg/kg) y T4 (422.0 mg/kg). De igual forma, el Al intercambiable superior a 2.0 mg/kg puede resultar fitotóxico, lo cual debe considerarse, pues el valor en T4 fue de 5.4 mg/kg.

Estos datos sugieren que, para garantizar la aplicación segura de biosólidos en suelos con pH bajo o cercano a neutro, se debe condicionar la dosis o implementar medidas correctivas como la encalación o la mezcla con suelos de mayor capacidad tampón. Este manejo diferencial lo respalda la normativa panameña (Decreto Ejecutivo N.º 110 del 2021, sobre uso de lodos en suelos agrícolas) e indica que “la aplicación de biosólidos debe considerar la capacidad de amortiguación del suelo, el pH y el contenido de metales pesados y nutrientes disponibles, a fin de prevenir efectos negativos en los cultivos”.

Asimismo, el pH fue medido en todas las muestras de suelo, al considerar su rol fundamental en la biodisponibilidad de nutrientes, la movilidad de metales pesados y la eficacia de enmiendas orgánicas. Estas mejoras en la calidad del suelo se reflejan también en la relación observada entre la altura de las plantas y la cantidad de lodo aplicada en cada tratamiento (Figura 11).

Figura 11. Desarrollo de mangle en cajas pioneras
120 días después de la siembra



Fuente: elaboración propia.

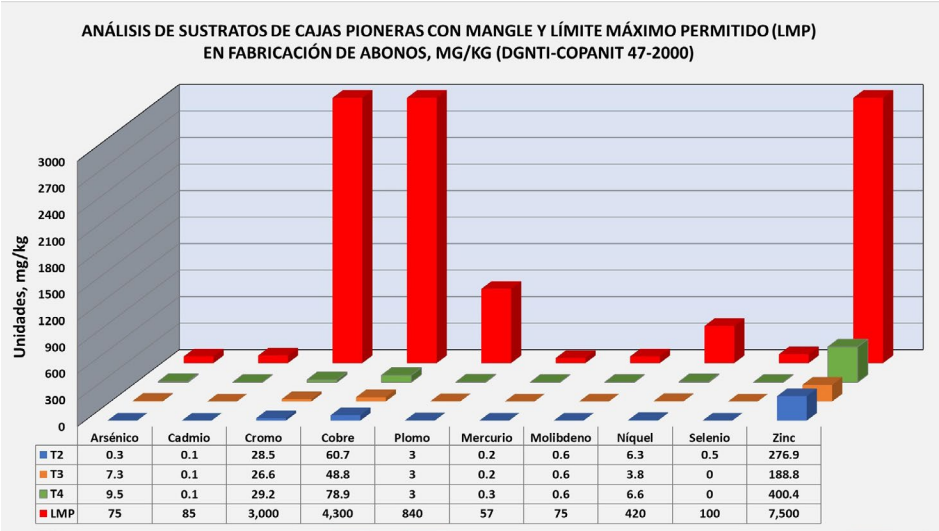
Durante el período de desarrollo de plantones se realizaron mediciones periódicas de altura de cada individuo (cm) y la cantidad de hojas arrojaron los siguientes resultados: se observó una mayor tendencia en la parte de crecimiento hacia el tratamiento T4, en el cual los individuos tuvieron su mejor desarrollo. Al finalizar el período de crecimiento de los plantones en vivero, las cajas pioneras fueron trasladadas al ambiente natural de la albina (Figura 12).

Figura 12. Albina La Honda, traslado y posicionamiento de cajas pioneras con mangle



Además de los análisis químicos de suelo degradado de la albina (T1) y los sustratos preparados (T1, T2 y T3), se tomaron las muestras de cada tipo de sustrato para realizar los análisis de metales pesados (Figura 13).

Figura 13. Análisis de metales pesados en los sustratos de cajas pioneras



Fuente: elaboración propia.

El resultado obtenido indica claramente que todos los parámetros analizados de metales pesados se encuentran dentro de los rangos permitidos por la normativa nacional vigente.

CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos en la presente investigación, titulada “Análisis de viabilidad y uso seguro de aguas regeneradas y biosólidos en agricultura y restauración de suelos degradados en la cuenca del río La Villa”, se logró establecer, como primer enfoque, las ventajas técnicas y económicas del uso de aguas residuales postratadas y lodos provenientes de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) Chitré-La Villa de Los Santos, en la zona baja de la cuenca del río La Villa.

Se alcanzaron todos los objetivos planteados, los cuales, mediante los resultados positivos, contribuyen a la seguridad alimentaria de la población de manera sostenible, y alivia la escasez de agua en la parte baja de la cuenca. Este enfoque se inserta dentro del contexto de la adaptación al cambio climático, al promover la reutilización del agua residual tratada para riego agrícola y el uso de los lodos estabilizados (UTP, 2023) como

abono para cultivos, además de la restauración de suelos degradados. Todo ello, siempre que sea pertinente y eficaz, asegurando a su vez la protección de la salud pública y el medioambiente.

Para alcanzar los resultados tangibles en la investigación, se realizaron los análisis foliares, bromatológicos y de metales pesados de los cultivos pasto y maíz, sembrados y cosechados en 30 parcelas experimentales, localizadas en los predios de la PTAR. Igualmente, se ejecutaron los análisis de la calidad de lodos, agua de riego y suelo de las parcelas, así como de lodos generados en la PTAR, todo esto con fines de evaluación de la compatibilidad bioquímica y de las interacciones físicas con el medio receptor, lo que permitió interpretar los parámetros obtenidos en función de la caracterización del suelo, el manejo del agua, el tipo de sistema de riego y la elección de la especie cultivada.

Se pudieron establecer los beneficios generados con la aplicación de biosólidos como abono orgánico en el crecimiento de forraje (pasto y maíz fresco), dando como resultado la mayor producción de leche por cada kg de materia seca (MS) consumida. Con respecto a la producción de leche, se considera como una referencia que, para condiciones de campo normal, conseguir entre 1,000 y 1,200 litro de leche/kg MS consumida, es una buena meta. Por esta razón, es importante recalcar que, en el caso de la investigación realizada, en las parcelas experimentales sembradas con el maíz, se obtuvo la mayor producción de leche por cada kg de materia seca (MS) consumida, así como en las parcelas sembradas con el pasto, 1,492 Litros/Ton MS y 1,503 Litros/Ton MS, respectivamente. Este logro se puede explicar por contar con la mejor calidad del forraje producido en las parcelas experimentales, debido a la aplicación de biosólidos y del agua postratada en humedales artificiales, rica en nutrientes.

Además del uso de biosólidos como abono orgánico en cultivos agrícolas se investigó el proceso de recuperación de suelos degradados con la aplicación de biosólidos provenientes del tratamiento de aguas residuales. Concretamente, se evaluó la posibilidad de restauración de suelos degradados de ecosistema de albinas, localizadas en la zona costera del corregimiento de Los Ángeles de la provincia de Los Santos. Para este fin en un vivero se instalaron 20 cajas experimentales o cajas pioneras con plántulas de mangle, en cuales se conformó el sustrato de diferentes dosis de biosólido y suelo degradado de albina. En el sustrato de estas cajas

fueron sembrados los propágulos de mangle rojo (*Rhizophora mangle*), de mangle salado (*Avicennia bicolor*) de un ecosistema de manglar local, las cuales después de cuatro meses fueron trasladados al área de albinas para colocarlas en su ambiente natural. Se realizaron los análisis químicos de sustratos generados y sus valores fueron comparados con los del suelo degradado de las albinas, que reflejaba la ausencia total de materia orgánica y el pobre contenido de nutrientes. Con los resultados obtenidos se puede observar cómo cambia el contenido de nutrientes en el suelo degradado de la albina (T1) y aumenta su fertilidad con la aplicación de distintas dosis de biosólidos (T2, T3 y T4), según el diseño establecido. Por lo tanto, desarrollar una tecnología para restauración de suelos degradados de ecosistema de albinas, utilizando biosólidos como una opción viable, al promover un cambio de paradigma en el cual se reconoce su valor en una economía circular. Esto permitirá impulsar la búsqueda de nuevas iniciativas, al crear la transición hacia una economía circular en la zona costera del distrito de Los Santos, en contexto de adaptación al cambio climático y desarrollo sostenible.

Al concluir este proyecto, los resultados de la investigación permitieron determinar la capacidad de depuración de la vegetación sobre las aguas postratadas, así como evaluar la viabilidad de aprovechar de manera segura el potencial aporte de nutrientes de estas aguas y del lodo estabilizado al suelo. Este aprovechamiento contribuye al aumentar el rendimiento agrícola, lo cual, a su vez, favorecerá la seguridad alimentaria y promoverá el desarrollo socioeconómico y la sostenibilidad ambiental en la parte baja de la cuenca del río La Villa.

Estos hallazgos resaltan la urgencia de desarrollar proyectos de investigación en Panamá sobre el uso de aguas postratadas y los efectos de los biosólidos en pastizales y otros ecosistemas. Dichos proyectos deberán ser multidisciplinarios para abordar adecuadamente los aspectos sociales, económicos, ecológicos y ambientales involucrados en este proceso.

AGRADECIMIENTOS

El equipo de investigación del proyecto expresa su sincero agradecimiento a las siguientes instituciones y organizaciones que posibilitaron y ofrecieron su valioso soporte a este proyecto:

A la Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (SENACYT), por su firme contribución al desarrollo científico-tecnológico del país.

Al personal de la Dirección Regional de Herrera y Los Santos del Ministerio de Ambiente (MIAMBIENTE), del Ministerio de Desarrollo Agropecuario (MIDA) y del Instituto de Acueductos y Alcantarillados Nacionales (IDAAN).

A los municipios de Chitré y Los Santos, a los miembros del Comité de Cuenca Hidrográfica del río La Villa y a las comunidades beneficiarias, por su actitud positiva y su aporte de conocimiento local. En particular, agradecemos a la Constructora RODSA, S. A., encargada de la PTAR de Chitré.

Al Centro Regional de Azuero de la Universidad Tecnológica de Panamá, por el apoyo brindado en la coordinación y realización de la Jornada de Sensibilización y el Ciclo de Conferencias sobre el uso sostenible del agua, el tratamiento de aguas residuales y el beneficio de lodos estabilizados o biosólidos como abono orgánico.

Al equipo de CATHALAC por su colaboración en la exitosa ejecución de este proyecto, y a los consultores M. Sc. Ing. Agrónomo Eric González, Ing. Carlos González y M. Sc. Geólogo Roneldo Arjona, por su apreciable participación y contribuciones en el desarrollo de esta investigación.

Este reconocimiento refleja el esfuerzo conjunto de todas estas entidades en la realización de esta investigación.

REFERENCIAS

- Alberto, R. (2020). *Técnicas y Buenas Prácticas para la restauración de ecosistemas y paisajes en Centroamérica y el Caribe*. Fondo de Desarrollo Verde para la región SICA / REDD+ Landscape Agencia de la GIZ. Bonn y Eschborn, Alemania.
- Autoridad Nacional del Ambiente (ANAM) (2008). *Plan de Ordenamiento Territorial Ambiental de la cuenca del río La Villa (POTA)*. Panamá: Autoridad Nacional del Ambiente.
- Cabezas Mejía, E.; Andrade Naranjo, D. y Torres Santamaría, J. (2018). *Introducción a la metodología de la investigación científica*. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Ecuador. ISBN: 978-9942-765-44-4

- Carr, R. M.; Blumenthal, U. J. y Mara, D. D. (2004). *Guidelines for the safe use of wastewater in agriculture: Revisiting WHO guidelines*. Water Science and Technology, 50(2), 31-38.
- Castro Piguave, C. A., Indacochea Ganchozo, B. S., Alcívar Cobeña, J. L., Vera Tumbaco, M., Vera Velázquez, R., Ortega, J. L. G. y Valverde Lucio, Y. A. (2022). Diseños experimentales: Teoría y prácticas para experimentos agropecuarios. Mawil Publicaciones de Ecuador. <https://doi.org/10.26820/978-9942-602-26-8>
- Cruz, L. (2015). *Optimización de la aplicación de lodos de depuradora de aguas residuales al abono o mejoras de suelo*. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid, España.
- Decreto Ejecutivo N.º 110 (2021). República de Panamá. “Reglamento Técnico para el Uso Agrícola de Lodos Residuales Tratados y Biosólidos”.
- Dirección General de Recursos Minerales. (DGRM) (1991). *Mapa Geológico de la República de Panamá; Escala 1:250.000*. Panamá: Ministerio de Comercio e Industrias, República de Panamá.
- Dourojeanni, A. (2011). *Red de Cooperación en la Gestión Integral de Recursos Hídricos para el Desarrollo Sustentable en América Latina y el Caribe*. Carta Circular N.º 34, Junio de 2011 CEPAL, Naciones Unidas.
- FAO. (2006). *Plant nutrition for food security: A guide for integrated nutrient management*. FAO Fertilizer and Plant Nutrition Bulletin No. 16.
- FAO/OMS (2010). Codex Alimentarius: Guidelines on the Application of General Principles of Food Hygiene to the Control of Pathogenic Vibrio Species in Seafood.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) (2013). *Reutilización del agua en la agricultura: ¿Beneficios para todos?* Informe sobre Temas Hídricos No. 35 FAO. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO).
- Garcimartín, C. (2020). *El agua en la economía de Panamá*. Banco Interamericano de Desarrollo (BID).
- González-Flores, E. et al. (2017). *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 8(1), 119-132.

- IDRC (2019). Informe Técnico Final: Fortalecimiento de la resiliencia de los recursos hídricos frente al cambio climático en dos ciudades de la cuenca del río La Villa del Arco Seco de Panamá. IDRC Digital Library/Bibliothèque numérique du CRDI. <https://idl-bnc-idrc.dspacedirect.org/search?query=cathalac>
- Instituto Geográfico Nacional “Tommy Guardia” (IGNTG) (2007). *Atlas Nacional de la República de Panamá*. Panamá: Instituto Geográfico Nacional “Tommy Guardia”.
- Instituto de Investigación Agropecuaria de Panamá (IDIAP) (2006). *Zonificación de suelos de Panamá por niveles de nutrientes*. Panamá: Instituto de Investigación Agropecuaria de Panamá.
- IDIAP (2016) <http://www.idiap.gob.pa/download/memoria-anual-2016/> (accessed 6/12/2025)
- IDIAP. (2019). *Proyecto Manejo de suelos degradados y uso eficiente del agua, en la Cuenca del Canal de Panamá*. Panamá: Instituto de Investigación Agropecuaria de Panamá. https://proyectos.idiap.gob.pa/proyectos/Manejo_de_suelos_degradados_y_uso_eficiente_del_agua_en_la_Cuenca_del_Canal_de_Panama/es
- Instituto Nacional de Estadística y Censo (INEC) (2010). *XI Censo de Población y VII de Vivienda, 2010. Resultados Finales*. Panamá: Instituto Nacional de Estadística y Censo.
- Interempresas Agua. (2019). *Reutilización de agua: un recurso abundante y seguro, cada vez más estratégico*. <https://www.interempresas.net/Agua/Articulos/245876-Reutilizacion-de-agua-un-recurso-abundante-y-seguro-cada-vez-mas-estrategico.html>
- IUSS Working Group (WRB) (2015). Base referencial mundial del recurso suelo 2014, Actualización 2015. Sistema internacional de clasificación de suelos para la nomenclatura de suelos y la creación de leyendas de mapas de suelos. Informes sobre recursos mundiales de suelos 106. FAO, Roma.
- Ministerio de Desarrollo Agropecuario (MIDA) (2009). *Resultados de la zonificación Agroecológica de 20 especies de pastos y forrajes en la República de Panamá*. Panamá: Secretaría Técnica Programa Nacional de Zonificación Agroecológica, Ministerio de Desarrollo Agropecuario.

- Ministerio de Ambiente de Panamá (MIAMBIENTE) (2021). Mapa de Cobertura Boscosa y Uso de Suelo, República de Panamá, Año 2021. Dirección de Dirección de Información Ambiental, Ministerio de Ambiente de Panamá.
- Neill, D. y Cortez Suárez, L. (2018). *Procesos y Fundamentos de la Investigación Científica*. Editorial UTMACH, Machala-Ecuador. ISBN: 978-9942-24-093-4
- OMS (2006). Guidelines for the Safe Use of Wastewater, Excreta and Greywater: Volume II-Wastewater Use in Agriculture. World Health Organization.
- ONU. (2017). *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2017. Aguas residuales: El recurso desaprovechado*. París: UNESCO.
- Opolenko, V. (2015). *Sensibilidad Medioambiental a la desertificación en la cuenca del río La Villa, República de Panamá*. (Tesis doctoral). Universidad Internacional de Andalucía y Universidad de Huelva, España.
- Opolenko, V. (2022). Potencialidad de uso de aguas servidas para riego y recarga de acuíferos: cuenca del río La Villa, República de Panamá. *Revista Geográfica de América Central*, 1(68), 269-304. <https://doi.org/10.15359/rgac.68-1.10>
- Opolenko, V. y Jiménez, A. (2022). *La reutilización de las aguas regeneradas y biosólidos, base de la economía circular en la cuenca del río La Villa de la República de Panamá*. Congreso Ibérico de las Aguas Subterráneas: Libro de resúmenes CIAS2022. Asociación Internacional de Hidrogeólogos-Grupo Español. ISBN: 978-84-920529-8-1. <https://cias2022.webs.upv.es/wp-content/uploads/2023/01/Libro-De-Resumenes2.pdf>
- Orozco Lab. (2023). *Lodos y biosólidos ¿Problema o Beneficio?* San Juan del Río, Qro. México. <https://www.orozcolab.com.mx/blog/lodos-y-biosolidos-problema-o-beneficio>
- Salas, J.; Pidre, J. y Sánchez, L. (2007). *Manual de tecnologías no convencionales para la depuración de aguas residuales: Humedales Artificiales*. España: Centro de las Nuevas Tecnologías del Agua (CENTA).

- Saravia Matus, S. *et al.* (2022). *Oportunidades de la economía circular en el tratamiento de aguas residuales en América Latina y el Caribe*. Serie Recursos Naturales y Desarrollo, N.º 213 (LC/TS.2022/193). Santiago: Comisión Económica.
- Seguí Amórtégui, L. A. (2004). *Sistemas de regeneración y reutilización de aguas residuales. Metodología para el análisis técnico-económico y casos*. Tesis doctoral, UPC, Departament d'Enginyeria Agroalimentària i Biotecnologia, 2004. ISBN 8468867373. DOI <https://dx.doi.org/10.5821/dissertation-2117-94371>
- Universidad Tecnológica de Panamá (UTP) (2023). Libro del XIX Congreso Nacional de Ciencia y Tecnología - APANAC 2023. Portal de Revistas de la Universidad Tecnológica de Panamá (UTP), 159. <https://revistas.utp.ac.pa/index.php/apanac/article/download/3864/4399/>
- US EPA. (1994). *A Guide to the Biosolids Risk Assessments for the EPA Part 503 Rule*. EPA/832-B-93-005.
- Villarreal, J. (2016). Caracterización físico-química de los suelos de la Región de Azuero-Panamá. Financiado con fondos del presupuesto de investigación del IDIAP- Proyecto: Zonificación Agroecológica de Suelos de Panamá. Instituto de Investigación Agropecuaria de Panamá-Centro de Investigación Agropecuaria. Panamá.
- WHO. (2006). Guidelines for the Safe Use of Wastewater, Excreta and Greywater-Volume II: Wastewater Use in Agriculture.
- WRB (2015) <http://www.suelos2015.es/publicaciones/informe/base-referencial-mundial-del-recurso-suelo> (accessed 6/12/2025)

