

Procedimiento integrado para la optimización del manejo autosostenible de nutrientes y residuos en fincas de Mayabeque

Integrated procedure for optimization of self-sustaining management of nutrients and wastes on farms in Mayabeque

 Mayra Arteaga-Barrueta^{1*} and  José Antonio Pino-Roque²

¹Universidad Agraria de La Habana “Fructuoso Rodríguez Pérez”, Facultad de Agronomía, Departamento de Química y Producción Agrícola, San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba.

²Universidad Agraria de La Habana “Fructuoso Rodríguez Pérez”, Facultad de Ciencias Técnicas, Departamento de Matemática Física, San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba. E-mail: pino@unah.edu.cu

*Autora para correspondencia: Mayra Arteaga-Barrueta, e-mail: mayra@unah.edu.cu

RESUMEN: El objetivo de esta investigación fue proponer un procedimiento para integrar soluciones prácticas y adaptativas de autogestión en el manejo de flujos de nutrientes, aprovechando los residuos endógenos en fincas locales de Mayabeque, contribuyendo así a la transición hacia una economía circular autosostenible. El procedimiento se basó en: (I) la determinación de las potencialidades endógenas para la generación de residuos y las limitantes en el flujo de nutrientes recirculados; (II) la identificación de acciones estratégicas; (III) el diseño de un procedimiento integral adaptativo. Se deriva un procedimiento que articula un sistema cíclico adaptativo de flujos de nutrientes de residuos endógenos generados, recirculados e integrados al proceso productivo en una finca local, para asegurar la base para la autogestión en la producción de bioensumos agrícolas con tecnologías accesibles. La estimación de los beneficios en inversión total fue de aproximadamente \$485 USD para La Esperanza y \$1280 USD para Nuestra Señora. La autosuficiencia en la alimentación animal se incrementó en un 95% en la primera finca, mientras que en la segunda se redujo el déficit de N y K en un 50% mediante un manejo más eficiente de residuos.

Palabras clave: reciclaje agrícola, residuos orgánicos, economía circular, compostaje, Bioproductos, sostenibilidad.

ABSTRACT: The objective of this research was to propose a procedure to integrate practical and adaptive self-management solutions in the management of nutrient flows, taking advantage of endogenous waste on local farms in Mayabeque, thus contributing to the transition towards a self-sustaining circular economy. The procedure was based on: (I) the determination of endogenous potential for waste generation and the limitations in the recirculated nutrient flow; (II) the identification of strategic actions; (III) the design of a comprehensive adaptive procedure. A procedure is derived that articulates a cyclical adaptive system of nutrient flows from endogenous waste generated, recirculated, and integrated into the production process on a local farm, to ensure the basis for self-management in the production of agricultural bioinputs with accessible technologies. The estimated total investment benefits were approximately \$485 USD for La Esperanza and \$1280 USD for Nuestra Señora. Self-sufficiency in animal feed increased by 95% on the first farm, while on the second farm, N and K deficits were reduced by 50% through more efficient waste management.

Keywords: Recycle, Organic Waste, Circular Economy, Composting, Bioproducts, Sustainability.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, se concede gran importancia al estudio agroecológico de los sistemas productivos como base para establecer y adoptar nuevas tecnologías, así como para desarrollar una economía circular sostenible, considerando las condiciones endógenas existentes. [Fundora et al. \(2024\)](#), respaldan esta afirmación con su estudio de caracterización agroproductiva en 57 fincas de la provincia de Mayabeque. Dicho estudio destaca desafíos importantes, como la alta incidencia de plagas y enfermedades, la escasez

de herbicidas y fertilizantes químicos, y la necesidad de alternativas nutricionales como abonos orgánicos y biofertilizantes. Estos últimos permitirían disminuir los costos, aumentar la productividad y sustituir importaciones. Sin embargo, pocos productores implementan acciones que integren la autogestión para mitigar estos factores limitantes. De ahí la importancia de fortalecer la educación y la adopción de tecnologías que promuevan el uso eficiente y el manejo integrado de las fuentes locales de nutrientes, adaptándose a las circunstancias, limitaciones y posibilidades de cada finca ([Rivera et al., 2020](#)).

Recibido: 23/03/2025

Aceptado: 10/10/2025

Contribuciones de los autores: Conceptualización; Curación de datos; Análisis formal; Metodología: M. Arteaga. Investigación; Supervisión; Validación; Redacción del borrador original; Redacción, revisión y edición: M. Arteaga, J. A. Pino.

La mención de marcas comerciales de equipos, instrumentos o materiales específicos obedece a propósitos de identificación, no existiendo ningún compromiso promocional con relación a los mismos, ni por los autores ni por el editor.



Este artículo se encuentra bajo los términos de la licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial (CC BY-NC 4.0).
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>



Dentro de las acciones más recientes para lograr el manejo integrado de las fuentes locales, se encuentra el establecimiento de biofactorías en fincas, adoptando modelos cíclicos de producción autosostenible de bioinsumos agrícolas, basados en el reciclaje de la biomasa generada en las fincas. Este aspecto aún no está generalizado en las fincas cubanas. La implementación de un modelo basado en indicadores de economía circular a largo plazo en la agricultura permite adoptar y medir el grado de 'circularidad' asociado a la gestión de los residuos (Quiroga, 2021).

Esto es posible mediante la aplicación de los principios de la agricultura circular en el agroecosistema: (I) Reducir la cantidad de insumos en el sistema, como fertilizantes químicos, pesticidas, restos de equipamiento de metal y plásticos. (II) Reducir el uso del agua y su contaminación. (III) Disminuir las emisiones durante los ciclos de producción. (IV) Reutilizar y agregar valor al biomaterial considerado desecho. (V) Ejercer la menor presión posible sobre el medio ambiente y los recursos naturales (agua, aire, naturaleza y biodiversidad). (VI) Promover suelos saludables. (VII) Fomentar el manejo agroecológico de plagas.

La circularidad del modelo se basa en los procesos de reutilizar, reparar o reciclar todo tipo de recursos y residuos para reintroducirlos en los sistemas productivos sostenibles, optimizando los procesos sin generar residuos y contribuyendo al cuidado del medio ambiente (Villalpanda, 2023; 2024). Esto representa un reto en el sector agrario, donde la producción es más exigente y necesita alternativas más eficientes para avanzar en la sostenibilidad productiva y medioambiental, respaldando así los objetivos de desarrollo sostenible planteados en la Agenda 2030 por la OCDE-FAO (2020).

El compostaje y la fermentación, como procesos biológicos controlados que imitan el ciclo de la naturaleza, tienen un enfoque integral que contribuye a reducir la generación de residuos y promover la reutilización de materiales, dándoles un valor de uso más actualizado en modelos circulares de biofactorías (MMA-ONU, 2021). De esta forma, se evita el desaprovechamiento de los residuos orgánicos y se promueve la reutilización de materiales que pueden ser mejorados en calidad nutritiva, generando ventajas productivas al contar con variedades de bioproductos que permitan un manejo autosostenible agroecológico y medioambiental. Estos bioprocesos se han convertido en centros para dar una solución adecuada a la validación de los residuos y establecer un manejo integral y sostenible de los nutrientes en las fincas. Esto constituye un gran reto que se basa en la introducción del modelo de economía circular, vinculando una serie de metas en el progreso de los objetivos de desarrollo sostenible. A través de ellas, se pueden cerrar ciclos de nutrientes y materia orgánica para lograr la gestión integral de los residuos, creando un sistema productivo más sostenible y eficiente.

El desarrollo de estas metas ha generado un mayor interés a nivel mundial (México, Chile, Colombia, Brasil,

Ecuador, Reino Unido, España, Estados Unidos) en el desarrollo de dichos procesos con bajos costos en modelos de producción cíclicos de bioinsumos en biofactorías en fincas para generar la autorrentabilidad de un proceso más competitivo (Restrepo, 2007). Sin embargo, en Cuba no se visualiza de forma generalizada dicha meta en la literatura especializada. Se tienen amplias referencias en el tratamiento de las aguas según Díaz *et al.* (2022) y como biofábricas para la producción de vitroplantas y semillas Noriega (2024); pero no aparece como un sistema de modelo integral para la producción de bioinsumos agrícolas con bajos costos y a nivel de sistemas productivos de fincas locales. La base de su implementación reside en las potencialidades endógenas en la gestión de los residuos generados en estas, permitiendo realizarlo como un modelo rentable con soluciones integrales viables y sustentables, brindando una oportunidad para darle un valor agregado a los residuos. Con esto se logra reducir el impacto negativo ambiental, incrementar la productividad agrícola con calidad y un manejo agroecológico autosustentable.

Siendo esto la base para implementar biofactorías de producción de bioinsumos agrícolas de bajo costo en las fincas locales, que garanticen su autosostenibilidad. Surge como alternativa viable para el mejoramiento de la autogestión para el desarrollo del programa de autoabastecimiento alimentario humano y animal territorial en armonía con el medio ambiente, bajo el desarrollo de una Agricultura Ecológica Circular.

El objetivo de la investigación consistió en proponer un procedimiento que integre soluciones prácticas-adaptativas de autogestión para el manejo de flujos de nutrientes con el aprovechamiento de los residuos endógenos en fincas locales con composición agrícola característica del territorio Mayabeque, que contribuya a establecer la transición hacia una economía circular autosostenible.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se realizó un estudio de caso comparativo (2021 y 2023) en dos fincas locales de San José de Las Lajas, municipio de Mayabeque, las cuales presentan un área y una composición agropecuaria típica de la región (Fundora *et al.*, 2024). El objetivo social de las mismas es la producción de viandas, vegetales, frutas y granos, así como la cría de ganado vacuno de leche y carne a pequeña escala, gallinas ponedoras, conejos, cabras y cerdos, con el fin de facilitar el autoabastecimiento de alimentos a la localidad. Además, suelen ser lugares de interés turístico por su ambiente rural y tranquilo, típico de la zona de Mayabeque. Para el estudio, se seleccionaron dos fincas representativas (en términos de área y variaciones climáticas anuales) de los grupos con mayor porcentaje existentes en la localidad, según el estudio realizado por Fundora *et al.* (2024) en 57 fincas de la localidad de Mayabeque.

Las fincas fueron seleccionadas mediante un muestreo intencional, buscando representar la diversidad de sistemas productivos presentes en la zona. A continuación, se describen algunas características de las fincas en estudio en la Tabla 1.

Tabla 1. Características de las fincas en estudio.

Fincas	La Esperanza	Nuestra Señora Regla
Ubicación en San José de las Lajas, Mayabeque	Carretera de Tapaste km 3 1/2 Km, CCS Nelson Fernández	Carretera de Zenea. CCS Manuel Fajardo
área (ha)	3	19
Representatividad dentro de la provincia	Grupo de las fincas en mayor porcentajes (38%), de las estudiadas en la provincia con áreas más pequeñas (0,1-9,5 ha)	Grupo de las fincas con áreas entre 19-20 ha, representadas por el 16% de las estudiadas en la provincia
Cultivos presentes y manejo	Realiza sucesión de cultivos: frijol-maíz-maní-ajo-boniato—tomate-calabaza-pepino—frijol- barbecho. Monocultivos perennes: plátanos, yuca, malanga, pastos, Canavalia. Frutas: caimito, guayaba, maracuyá, mango, aguacate, mamoncillo, guanabana, coco, fruta bomba.	Pastos, frutales: guayaba, mango, aguacate, guanabana, plátano, coco, fruta bomba, naraja agria, limón. La sucesión de cultivos se presenta: Maíz -frijol -Maíz- soya-tomate calabaza -frijol-maíz- pepino -frijol-maíz- ají. Pastoreo y barbecho
Cría de Animales	6 vacas, 50 conejos, 25 gallinas, 20 cerdos, 2 /bueyes	15 vacas, 50 carneros, 30 gallinas, 25 cerdos, 2 /bueyes
Suelo Ferralítico Rojo (2021)	pH 7.2 %SOM 1.5 K 0.35 cmol/kg P 0.95ppm N 0.10% Rel. C/N 11.98	pH 6.31 %SOM 1.47 K 0.6 cmol/kg P12 ppm N 0.09% Rel. C/N 12
Suelo Ferralítico Rojo (2023)	pH 7.6 %SOM 2.53 K 0.45 cmol/kg P 12.3ppm N 0.13%, Rel.C/N 12	pH 6.5 %SOM 2 K 0.8 cmol/kg P 15ppm N 0.12% Rel. C/N 12.2
Aplicación Compost (2023)	8-10 t/ha y 0.5 t/ha cenizas /5 t compost	≈15 t/ha y 0.5 t/ha cenizas /5 t compost

Los datos climáticos promedios anuales de San José de las Lajas, Mayabeque, fueron registrados en el Instituto de Meteorología de Cuba [INSMET-Cuba \(2024\)](#), y utilizados en la estimación de la biomasa ([Tabla 2](#)).

El procedimiento de trabajo constó de los siguientes pasos fundamentales: (I) Determinar las potencialidades endógenas existentes en las fincas en la generación de residuos y las limitantes para desarrollar el flujo de nutrientes recirculados que viabilicen el aprovechamiento integral de los residuos endógenos generados en las mismas. Para ello, se aplicaron instrumentos de recolección de información (entrevistas semiestructuradas, encuestas y análisis de la Matriz DAFO). (II) Estimar el potencial de biomasa disponible en las fincas para su utilización. (III) Identificar estrategias de trabajo de acuerdo con las condiciones endógenas en las fincas, que permitan el aprovechamiento de los residuos de manera más eficiente y sustentable. (IV) Diseñar un procedimiento metodológico integral que vincule acciones estratégicas endógenas y adaptativas en las fincas locales con composición típica, que integre los ciclos de flujos de nutrientes de los residuos endógenos para darles un valor de uso en la producción de bioinsumos.

El procedimiento de trabajo constó de los siguientes pasos fundamentales: (I) Determinar las potencialidades endógenas existentes en las fincas en la generación de residuos y las limitantes para desarrollar el flujo de nutrientes recirculados que viabilicen el aprovechamiento integral de los residuos endógenos generados en las mismas. Para ello, se aplicaron instrumentos de recolección de información (entrevistas semiestructuradas, encuestas y análisis de la Matriz DAFO). (II) Estimar el potencial de biomasa disponible en las fincas para su utilización. (III) Identificar estrategias de trabajo de acuerdo con las condiciones endógenas en las fincas, que permitan el aprovechamiento de los residuos de manera más eficiente y sustentable. (IV) Diseñar un procedimiento metodológico integral que vincule acciones estratégicas endógenas y adaptativas en las fincas locales con composición típica, que integre los ciclos de flujos de nutrientes de los residuos endógenos para darles un valor de uso en la producción de bioinsumos.

Las acciones ejecutadas se estructuraron en las siguientes fases, a partir de las herramientas de recolección de información:

Tabla 2. Datos climáticos promedios medios anuales registrados para la zona de San José de las Lajas, Mayabeque [INSMET-Cuba \(2024\)](#)

Parámetros medios anuales	Año 2021	Año 2023
Precipitación mm	900 (menos del 5% vs datos hist'óricos de 30 años)	1500 (menos del 20 % vs datos hist'óricos de 30 años)
Temperatura °C	26,65 (Tmax.+ 3 °C sobre la media hist'órica)	25,5 (+ 1 °C sobre la media hist'órica)
Humedad relativa	75 %	82%
Evapotranspiración	1500 mm	1700 mm
Radiación solar	1700 kWh/m ²	1900 kWh/m ²
Velocidad del viento	10 km/h	15 km/h
Eventos extremos	sequía Moderada julio-agosto: 33-34 °C	Lluvias intensas agosto: 177 mm, 32 °C

1. Diagnóstico participativo: Se desarrolló con la metodología de Investigación-Acción-Participativa (IAP), mediante talleres con actores locales (productores, investigadores del complejo científico y cooperativistas), para el análisis de las condiciones endógenas y la caracterización socio-productiva: identificación de recursos naturales (suelos, agua, biodiversidad y biomasa existente), infraestructura tecnológica disponible y mano de obra, cultivos principales, sistemas ganaderos y prácticas actuales (San Juan y Rodríguez, 2016). En las entrevistas se aplicó el método empírico, utilizando entrevistas semiestructuradas con variables sugeridas a los trabajadores (Villarreal y Cid, 2022).
2. Recopilación de información proporcionada por la literatura especializada en estudios realizados en fincas locales de la provincia de Mayabeque (Casimiro, 2016; Casimiro y Casimiro, 2018; Báez *et al.*, 2021; Rodríguez, 2022; Fundora *et al.*, 2024).
3. A partir de las informaciones obtenidas en los pasos anteriores, se identificaron problemas y potencialidades a través del análisis de la matriz DAFO (debilidades, amenazas, fortalezas y oportunidades) de las condiciones presentes en las fincas, según la metodología propuesta por Nogueira *et al.* (2024).
4. Estimación del potencial de biomasa disponible en las fincas para su utilización como materia prima en la elaboración de bioinsumos. El procedimiento seguido para la estimación de la biomasa generada en las fincas en los años 2021 y 2023 se muestra en la Tabla 3, con las herramientas, métodos utilizados y las referencias bibliográficas de los mismos. La metodología reflejada se derivó de la integración de procedimientos referidos en la literatura especializada.
5. Análisis de autosostenibilidad de las fincas con las biomásas generadas. Para determinar si una finca es sustentable a partir de su propia biomasa para la alimentación animal y la producción de bioinsumos agrícolas, se estructuró un procedimiento basado en métodos investigativos y conceptos utilizados en agroecología, manejo sostenible de fincas y economía circular; con un enfoque integral y de adaptación práctica para las fincas, basado en los estudios científicos especializados referidos en la literatura. Para evaluar la autosostenibilidad del proceso, se realizó además el estudio con la aplicación de bioinsumos obtenidos por los productores de las fincas en el año 2023. La Tabla 4 refleja los indicadores que lo componen y las citas bibliográficas que los sustentan.

RESULTADOS

Los datos promedios anuales de los años evaluados registrados para la zona de San José de las Lajas, Mayabeque se reflejan en la tabla 2. Estos sugieren la ocurrencia de un estrés climático.

En el año 2021 se evidencia una sequía moderada y prolongada, con escasos hídrica en cultivos (junio-septiembre), determinado por reducción en las lluvias en un 25% con relación a las medias históricas con humedad más baja en un 75% y radiación solar mayor (5%). Las temperaturas ligeramente superiores en 0,3% en máximas. En ambas fincas los efectos son menos afectados en los cultivos de siembra de ciclo corto en sucesión por suplir las lluvias con riegos, de acuerdo a los expresado por los productores. No siendo así, para los pastos y frutales. Para el año 2022 se mantuvo irregular las precipitaciones, con picos durante los eventos (huracán Ian y vaguadas), que provocaron abundantes lluvias (superior e irregular a la media histórica de la zona) y elevada humedad.

En el año 2023 ocurrió una humedad elevada (82%), con menos horas de sol (6%) por nubosidad persistente; un calor más intenso con aumento de las temperaturas en un 1 °C sobre la media histórica. Las lluvias se incrementaron en un 25%, siendo extremas para agosto (177 mm + 130%) con relación a los datos históricos con inundaciones locales. Los vientos alisios fueron superiores en intensidad los que pueden transportar mayor contenido de humedad. Fue un año con efectos indirectos de cambios climáticos o sistemas frontales puntuales como la tormenta tropical Phillippe y ondas tropicales que generaron lluvias intensas. Estos efectos post eventos climáticos que repercuten y pueden impactar en la formación de biomasa en las áreas.

Información recopiladas en las fincas para la determinación de las potencialidades endógenas existentes. Análisis con la aplicación de la Matriz DAFO

Con la información recopilada y procesada de los resultados de las entrevistas, talleres participativos, con los productores de las fincas y la literatura especializada, se identificaron las fortalezas, debilidades, amenazas y oportunidades a través del análisis de la matriz DAFO, los resultados se resumen en la Tabla 5.

Con la realización del cruces de los indicadores DAFO se deriva un análisis estratégico para establecer acciones oportunas que permitan la autosostenibilidad de las fincas con la valorización de los residuos endógenos:

1. **FO** (Fortalezas + Oportunidades): Usar los residuos para la producción de bioinsumos agrícolas para el consumo endógeno y/o como para sufragar necesidades externas. Desarrollar turismo ecológico mostrando el ciclo de residuos para su validación en bioinsumos.
2. **DO** (Debilidades + Oportunidades): Gestionar modelo de bajo costo para adquirir tecnología de producción de bioinsumos con la validación de los residuos endógenos. Identificar las rutas cíclicas del manejo sostenido de los residuo endógenos

Tabla 3. Metodología utilizada para la estimación de la biomasa vegetal y animal en las fincas. BMT: Biomasa total (t/ha), R: Rendimiento (t/ha)

Paso	Herramienta/Método	Función	Referencias Bibliográficas
1. Determinación de datos espaciales de las fincas con imágenes satelitales	GPS Sentinel-2 (B4-RED,8-NIR, 10m res.). Copernicus Open Access Hub QGIS 3.28	Obtención de bandas espectrales (RED, NIR) 2021-2023 Cálculos NDVI + zonal Statistics	USGS (2024)
2. Cálculo del índice de vegetación diferencial normalizada prom. ponderado.	NDVI(QGIS + SCP Plugin) NDVI + correlación genérica ($R^2 + 0,68-0,79$), para especies nativas. Google Earth Engine	Calcular vigor Veg. NIR- RED NIR+RED Análisis temporal NDVI	Costo et al. (2020)
3. Aplicación de Modelos Alométricos (MA) en agroecosistemas cubanos. MA + estadísticos	Modelos Alométricos Biomasa B BFrutales= $112,5 \times \text{NDVI}-18,3$ ($R^2=0,81$) Bpastos = $2,5 \times \text{NDVI} + 0,8$ BCultivos anuales = $1,8 \times \text{EVI}-0,3$ R Studio	Convertir NDVI en biomasa (t/ha).	González et al. (2021) INIVIT-Cuba (2023) Dengsheng et al. (2016)
4. Validación de la Biomasa estimada por satélite con la determinada por datos agronómicos	Metodología por tipo de cultivo a partir de la determinación del índice de cosecha(IC) Eslacalado en área de siembra (Información del Agricultor 2021 y 2023). Rendimiento económico Conversión a Biomasa total Ajuste por manejo Comparación con la biomasa estimada por Sentinel-2. (error $\leq 15\%$)	GPS Agrícola + QGIS R: Producción/área índice de Cosecha (IC) = tabla BMT= R/IC Coeficiente de estrés hídrico Biomasa ajustada (Baj) Baju = Biomasa x (1- %d'eficit hídrico)	Taiz (2025) Guía metodológica IPCC (2019)
5. Ajuste climático	Datos climáticos promedios de San José Laja, Mayabeque, Cuba Datos INST. MET. Cuba	Corregir biomasa por sequia/humedad. Post estrés Reducción biomasa en % por cultivo por evento Vientos mayor de 80 km	
6. Cálculo Final Biomasa total de la finca	área ponderada	Biomasa total (BT) $BT = \sum (\text{área} \times \text{biomasa})$	González et al. (2021)

generados en la finca y la localidad para la producción de bioensumos con bajo costo. Creación de estaciones de compostajes. Introducir modelo circular de una biofactoría con bajo costo para la producción de bioensumos. Capacitar actores en el procedimiento de manejo circular de los residuos endógenos en la finca, a través de talleres participativos actores endógenos de la finca y locales.

- FA (Fortalezas + Amenazas):** Crear Banco de Biomasa con la identificación de los ciclos en que se generan y se pueden utilizar en la finca la reutilización de los residuos. Para mitigar impactos negativos como los climáticos.
- DA (Debilidad + Amenazas):** Garantizar alianzas con otras fincas para desarrollar mercado de bioensumo o de capacitación en el tema. Implementar sistema de monitoreo en la cuantificación de los residuos. Brindar servicios en cuanto a diseños de ciclos de flujos de nutrientes en la finca de acuerdo a los recursos endógenos en ella.

Estos resultados obtenidos con el análisis de la matriz DAFO, se corresponden con los obtenidos por Fundora

et al. (2024), en la caracterización de 57 fincas locales de la provincia Mayabeque. donde la valoración integral de la matriz DAFO. En ambos estudios se identificó la necesidad de aprovechar los recursos existentes en las fincas, lo cual promueve su autoabastecimiento, intensificar la capacitación de los productores fundamentalmente en el conocimiento de su entorno que le permita valorar sus potencialidades y la realización de otras acciones de innovación con la participación activa de los campesinos, de modo que puedan impulsar: (I) el uso integrado de bioproductos obtenidos de fuente de nutrientes locales, abonos verdes. (II) mejora en la calidad semillas. (III) monitoreo del mantenimiento de la fertilidad durante su uso. (IV) el incremento de la productividad de los cultivos.

Se evidencia la prioridad en la adopción de estrategias que se fundamenten en la innovación agrícola en las fincas, para el manejo integrado de la fertilidad de los suelos, con el uso de de bioproductos integrados y fuentes locales de nutrientes en las mismas. Esto proporciona prácticas agrícolas sostenibles con la creación de espacios cruciales para la capacitación y el intercambio entre los productores, extensionistas e investigadores.

Tabla 4. Indicadores utilizados para la estimación de la sostenibilidad de las fincas con la Biomasa generada

Indicadores	Procedimiento	Métodos	Referencias citadas
Biomasa estimada anual (t/año)	Evaluación biomasa: Biomasa vegetal Biomasa animal (estiércol)	B. Vegetal. Satélites-2/NDVI. Modelos alométricos. Validación con Método no destructivo de campo (Rendimiento económico, tipo de cultivo con índice de cosecha IC), Eslacalado en área de siembra). B.Estiércol: Análisis para fincas integradas (agricultura-ganadería-bosques).	Chave et al., (2014) IPCC (2019) Fernández (2020) FAO (2022)
Autosuficiencia animal %	Requerimiento anual (t/año) Demanda Alimentación animal (t/año)	Balance alimentario Metodología para evaluar autosuficiencia alimentaria en sistemas ganaderos.	FAO (2018) FAO (2021; 2022)
Huella del Carbono (t CO ₂ eq/ha)	Determinación del secuestro, emisiones y Balance de Carbono.	Basado en Estándares de IPCC, 2019 y adaptado a sistemas agropecuarios tropicales.	IPCC (2019)
Materia Orgánica del suelo %	Oxidación húmeda Espectrofotocolorímetro UV, (559 nm)	Walker-Black, 1934 Calorimétrico	NC:10390 (1999)
pH a 25°C	pH metro PHSJ-3F, 1:2,5: suelo; agua	Potenciométrico	NC:39 (1999)
Demanda bioensumo (t/año)	Determinación de extracción de nutrientes por cultivos (kg/ha/año) con tsbla de requerimientos. Calcular nutrientes aportados por bioensumos.	Análisis del reciclaje de nutrientes (NPK), comparando los nutrientes por cultivo (kg/ha/año), usando tabla de requerimiento.	FAO (2021) Paneque (2002) Sánchez (2019) Palm et al. (2001) INCA-Cuba (2023)
Porcentaje de autosuficiencia %	Reciclaje de residuos %	Relación e/ biomasa producida/ demanda nutricional (ANIMAL , CULTIVOS) índice de sostenibilidad (0-100%)	FAO (2021) González et al. (2023) Altieri (2002) FAO (2016) Azapagic (2003) (INIA-Cuba (2020)

Tabla 5. Resultados de la matriz DAFO aplicada

Categoría	Factores Internos (Fortalezas y Debilidades)	Factores Externos (Amenazas y Oportunidades)
FORTALEZAS	Generación de residuos. de media a alta con altos niveles de biodiversidad. Desarrollo de la Investigación e innovaciones dentro del complejo científico. Los productores se encuentran agrupados por las CCS, lo que puede facilitar el desarrollo de actividades participativas con ellos. Los productores cuentan con sistemas de riego. Suelos generalmente productivos. Necesidad de empleo de abonos orgánicos.	OPORTUNIDADES Alta demanda creciente de bioinsumos en mayabeque. Utilización de los residuos endógenos para la autogestión de bioensumos agrícolas. Existencia de productores vinculados a centros y proyectos de investigación. Los productores cuentan con la asignación de insumos por el MINAG, pero no de manera sistemática. Programas estatales cubanos de apoyo a la economía (tarea vida, proyecto de desarrollo local). Potencial para el turismo educativo (rutas de sostenibilidad).
DEBILIDADES	Poca cultura en el conocimiento de las potencialidades materiales de la finca para el aprovechamiento de los residuos generados en ella. Limitada infraestructura para el procesamiento de los residuos. Baja tecnificación en manejos de residuos para garantizar su máximo aprovechamiento. Calidad nutricional del compostaje con poco aprovechamiento (Vermicompostaje no desarrollado). Aplicación de tecnologías de bajo costo limitada. La fertilidad del suelo y calidad de las aguas se trabaja empíricamente (experiencia) y no con análisis de monitoreo. Preferencia de los productores a utilizar productos químicos que sus propios abonos orgánicos. Poco uso de abonos verdes. Poca cultura en el manejo de integrado de nutrientes. Escasa cultura de registro y cuantificación de residuos	AMENAZAS Eventos climáticos externos que afectan la producción y recolección de la biomasa. Dependencia y dificultades en la adquisición de insumos externos. Altos costos de producción. Burocracia en permisos para proyectos innovadores.

Estimación del potencial de biomasa endógenas aprovechables en las fincas

El potencial de biomasa con que cuenta la finca es crucial para el desarrollo de acciones que permitan su reutilización en la producción de bioensumos. Uno de los

indicadores que permite inferenciarlo es el valor de índice de vegetación diferencial normalizada (NDVI), estimado con la información del análisis de imágenes satelital validado por la metodología agrícola (por tipo de cultivo), para medir “la salud verde” en las fincas se representa en la [Tabla 6](#).

Tabla 6. Potencial de biomasa estimado y análisis integrado de sostenibilidad en fincas “La Esperanza” (3 ha) y “Nuestra Señora” (19 ha) para 2021 (sin aplicación de bioensumos) vs 2023 (sin y con aplicación de bioensumos).

Parámetros	La Esperanza (3ha) (2021 vs 2023)	Nuestra Señora (19 ha) (2021 vs 2023)
Índice de vegetación diferencial normalizada promedio ponderado (NDVI)	0,43/0,39	0,56/ 0,47
1. Biomasa total (BT) (t/año)	150,77/ 134,10	109,8/225,4
Vegetal	140,0/125,0	100,0/200,0
Estiércol animal	10,77/9,10	9,8/25,4
2. Requerimientos	NPK	NPK
Cultivos (NPK kg/ha)	108, 15, 90/96,12,90	90,27,139/81,26,136
Alimentación animal (t)	42,3/45,6	78,2/85,6
Demanda bioensumo (t/ año)	18,50/20,20	32,4/38,7
3. Autosuficiencia	71/78	55/82
Alimentación animal (%)	-90, -27,-139/-21, -11,-111	-270,-72, -414/181,-51,-386
Balance NPK déficit (kg)		
4. Indicadores de suelo	1,8/2,53	1,3/1,7- 2,53
Materia orgánica del suelo, MOS (%)	12/12	11,95/12-12,2
Relación C/N	-1,2/-4,5	-15,7/-12,1
Huella de C (CO ₂ eq/ha)	65/88	45/75
Reciclaje residuos (%)		
5. Producción de Bioensumos	15/17	15/35
Compost (t)	2,000/3000	2000/3000
Biol (L)		
6. Autosuficiencia Con Bioinsumos	85/95	71/95
Alimentación animal (%)	-60, -5,-80	-150,-30,-300/-50,-10,-200
Balance NPK déficit (Kg)		

En ella los valores reflejados del índice de vegetación diferencial normalizada (NDVI) de 0,43/0,39 para 2021 y 2023, respectivamente, se encuentran en el rango de 0,1-0,5 para finca como La Esperanza; los cuales sugieren una composición vegetal caracterizada por pasto, barbecho y cultivos jóvenes. Estos son menores en valor comparado con el obtenido en la finca Nuestra Señora (0,56/0,46), los que son descritos para frutales y árboles mucho más densos y desarrollados (0,6-0,8). Estos resultados son validados con los estudios en 45 fincas de Mayabeque en eventos post estrés obtenidos por la misma metodología utilizada referidos por [Hernández \(2020\)](#) y [González et al. \(2021\)](#).

En ambas fincas los valores del NDVI disminuyen del año 2021 al 2023, en un 9,3% para La Esperanza y en 17,9 % para Nuestra Señora, encontrándose dentro del rango de disminución límites aceptables para bosques y frutales referidos entre 15-30% por ([López et al., 2020](#)). En la finca para La Esperanza se encontró entre 10-25% para cultivos de ciclo corto y jóvenes referidos en estudios post estrés climáticos por dichos autores.

Se corresponde con lo analizado con relación a los datos climáticos reflejados en la [Tabla 2](#) para la etapa de estudio (2021-2023), donde Cuba se vió afectada por eventos climatológicos que provocaron periodos lluviosos y de sequía moderada y persistente, que pudieron repercutir en la formación de biomasa en el 2023.

Con semejante tendencia se presenta la biomasa total estimada para las fincas del año 2021 al 2023 ([Tabla 5](#)). En La Esperanza disminuyen los valores en un 11,12%, encontrándose dentro del rango del límite inferior de caída de la biomasa entre 10- 40%, establecidos por [Hernández \(2020\)](#), cuya recuperación se plantea entre 3-6 meses

aproximadamente en cultivos donde predominan malanga/ plátano/pastos/cultivos anuales.

Para la finca Nuestra Señora la caída de la biomasa se presentó en un 16,1%, siendo menor que el rango de caída de la biomasa entre 40-60% referida para árboles frutales y bosques por estos autores. Esta menor incidencia puede estar relacionado con el proceso de recuperación en el tiempo, que puede ser beneficiado con la aplicación de compost (en proporción 5t compost: 0,5 t/ha cenizas), realizados por los productores con sus propios residuos en el año 2023, contribuyendo a la tendencia de recuperación de la biomasa, no en su plenitud porque lo aplicado solo cubre el 50% aproximadamente de la demanda de bioensumos general estimada para cada finca ([Tabla 4](#)); pues para suelos con déficit de NPK se sugiere aplicar 5-20 t/ha de compost, de acuerdo a lo referido por [Paneque \(2002\)](#).

Los autores [Hernández \(2020\)](#) y [González et al. \(2021\)](#), plantean como factores fundamentales que determinan en las pérdidas de biomasa en Mayabeque por eventos post climáticos: (I) El tipo de suelo rojo (Ferralítico Rojo) que tienen una baja infiltración hídrica, provocando inundaciones prolongadas y pudrición radicular a los cultivos, sobre todo los de menor altura. (II) El exceso de lluvias puede lavar nutrientes del suelo (lixiviación), como el nitrógeno, reduciendo su disponibilidad para las plantas a largo plazo. La calidad nutricional de la biomasa puede tener menos concentración de nutrientes (proteínas y minerales) debido al rápido crecimiento impulsado por agua y un mayor contenido de humedad. Las condiciones húmedas favorecen el crecimiento explosivo de malezas, que compiten con los cultivos y pastos deseados. (III) La intensidad de los vientos mayores de 180 km/h causan

2-3 veces más daño que las tormenta tropicales. (IV) El manejo agrícola determina en la mayor resiliencia radicular de los cultivos, Estas dificultades fueron planteadas por los productores de ambas fincas en las entrevistas y encuestas aplicadas, se corresponden con las dificultades referidas en los estudios de 57 fincas en Mayabeque por Fundora *et al.* (2024). Estos resultados también se corresponden con los incrementos de temperatura sobre la media histórica de 30 años (Tabla 2), para 2021 lo que puede repercutir en menor biomasa vegetal por estrés hídrico y afectación de la alimentación animal por escasez de forraje.

Estos eventos modifican la tasa respiratoria de las plantas y animales, fotosíntesis y desarrollo fenológico de los cultivos y pastos. La seca determina la disponibilidad hídrica para el crecimiento, influyendo con la humedad en la evapotranspiración y estrés hídrico. Repercutiendo todos estos parámetros en la formación de biomasa (Taiz, 2025). Los autores refieren, que el déficit hídrico es el factor limitante principal para el crecimiento vegetal (plantas más pequeñas con menos hojas vigorosas, con posible marchitamiento y senescencia prematura). Pastizales menos densos y productivos, cultivos forrajeros y vegetación natural. Menos diversidad de especies tolerantes a la sequía. La calidad nutricional de la biomasa se puede ver afectada al aumentar la concentración de fibras (menos digestibles) y disminuir el contenido de proteínas y energía en las plantas al crecer más lentamente o entrar en estrés.

Es importante considerar en el año 2023, la relación NDVI/biomasa no sigue la tendencia esperada de variar positivamente con la combinación de los factores: (I) La ocurrencia de eventos de estrés climáticos lo provocan en el vegetal, la saturación del suelo Ferralítico Rojo Lixiviado y el lavado de nutrientes, lo que reduce la actividad fotosintética y baja el NDVI, pero no necesariamente la biomasa acumulada, especialmente la leñosa que tienen estructura pesadas. (II) Vegetación leñosa (mango, aguacate, ficus) voluminosa, alta y el NDVI es bajo, al ser sensible a la clorofila y al estrés hídrico, las lluvias excesivas pueden causar clorosis, o caídas de hojas reduciendo el NDVI a pesar que exista una biomasa acumulada alta que incluye estructuras no fotosintéticas como raíces, troncos y ramas de árboles que persisten. (III) humedad persistente posibles interferencias en la mediciones satelitales (nubes/resolución). (IV) El uso de bioensumos como el compost, influye en el metabolismo de las plantas y en la formación de biomasa acumulada, follaje.

Las repercusiones en la producción de estiércol animal también se ven afectadas por el estrés climatológico, pues es el resultado de la digestión del alimento consumido por los animales (principalmente forraje/biomasa vegetal). La producción de estiércol esta directamente relacionada con la cantidad de biomasa vegetal disponible para alimentarse, la digestibilidad y composición del alimento, si el forraje tiene calidad nutricional (diluida por rápido crecimiento), el estiércol también lo podrá tener menor aunque el volumen no varíe (Elizondo, 2004).

El año 2021 (seco), menos disponibilidad de forraje para los animales al tener menos pasto fresco para consumir. De acuerdo a lo planteado por los productores de las fincas en este año, tuvieron que utilizar más alimento concentrado en piensos y reservas de heno y ensilaje, que son más costosos y escasos, en careciéndole el proceso. El pasto seco a diferencia del fresco tiene la característica de una digestión diferente del pasto, dando menor volumen de producción de estiércol por animal por menor consumo de materia seca en forraje voluminoso.

En el 2023, de acuerdo a lo referido por los productores a la hora de hacer el compost el exceso de lluvias le trajo problemas en su manejo, al recolectarlo y almacenarlo, expandirlo, virarlo, con aumento de los lixiviados y dar compostas o fertilizantes de mala calidad, por tanto no lo aprovecharon eficientemente. Teniendo como dificultades principales la escasez de alimento, costo de los suplementos y en el 2023 distinguen además de la situación del manejo con exceso de agua, el estiércol y la biomasa se pérdida por humedad. Refirieron como una dificultad importante el desarrollo de enfermedades y malezas a enfrentar. Aclararon, que la cantidad y tipo de animales disponibles no variaron significativamente entre los años de estudio.

A pesar de estas dificultades se pudo apreciar el impacto en la mejora del manejo de los cultivos y suelo con la aplicación del compost que repercutieron en un menor efecto como consecuencia de los cambios negativos que repercuten en la formación de la biomasa. Aunque la elaboraron de compost con los residuos de las fincas en el año 2023, estuvo a un 50%, determinó en la cantidad alimento para los animales y por tanto repercutió en la formación de los volúmenes de estiércol (Tabla 6). Bajo estas condiciones aun no maximizadas de aprovechamiento al 100% de los residuos los resultados mostraron una tendencia al ciclo cerrado de recirculación de los residuos que contribuya a la autosostenibilidad de la finca (Tabla 6).

Análisis de autosostenibilidad de las fincas con las biomásas generadas

Con la modificación de la biomasa del año 2021 al 2023, se destacaron otras tendencias (Tabla 6):

- I. La autosuficiencia animal mejoró notablemente sin/con la aplicación del bioensumo al 50%, aunque aún en el balance de nutrientes persisten brechas en el elemento potasio (K).
- II. La huella de Carbono (C) en ambas fincas son carbono negativas, sugerido el mayor secuestro de C en 2023 (mayor contenido de MOS y Biomasa).
- III. En los suelos la MOS aumentó aproximadamente en 1%, en ambas fincas, manteniéndose la relación C/N estable (12), indicando calidad orgánica estabilizada (Paneque, 2002).
- IV. En el reciclaje de los residuos la eficiencia disminuye por factores estructurales: tipo de residuos en la finca Nuestra Señora aproximadamente en el 40%, pues son residuos leñosos de podas frutales y ficus,

los cuales requieren trituración, cuyo equipo no está disponible. Se plantea (INCA-Cuba, 2020), que la tasa de reciclaje de estos residuos es menor en un 35% que los herbáceos como la malanga y el plátano en la finca La Esperanza.

El estiércol de mayor cantidad de animales (Nuestra Señora), provoca mayores pérdidas, por escorrentías en corrales abiertos, mientras que cuando es menor la cantidad de animales es más fácil el manejo para obtener un compostaje más eficiente (La Esperanza). La escala-dispersión afecta negativamente los niveles de complejidad de su recolección afecta. En la finca la Esperanza es mayor entre un 13-20% la independencia en el reciclaje, lo que puede estar dado por la dispersión de los residuos concentrados en 3ha, mientras que en nuestra Señora hay mayor distancia entre las áreas (15 ha), lo que deriva que se requiere aproximadamente más de un 30% de mano de obra/jornadas. En estudios de casos en fincas mayor de 15 ha, el transporte interno de residuo reduce la eficiencia entre un 20-40% (Altieri, 2002; FAO, 2021).

A esta diferencia en el % de reciclaje de residuo se adiciona el manejo agronómico realizado en cada finca, para Nuestra Señora la rotación la realizan de forma más compleja (7 cultivos) donde los residuos quedan en el campo como cobertura (no se recolectan), en La Esperanza el cultivo en franjas permite su recolección. En sistemas más diversificados reciclan menos del 15% de los residuos (Altieri, 2002). Esto enfatiza el impacto positivo de la aplicación de compost obtenido por el productor con sus recursos.

La incorporación de la transformación de la biomasa al estudio de sostenibilidad brinda el eje fundamental para el desarrollo de la bioeconomía circular en tres niveles: (I) Ambiental al aportar los ciclos cerrados de nutrientes (residuo-energía-abono). (II) Social en el empleo estable en zonas rurales. (III) Económico con el ahorro en energía y la obtención de más ingresos por venta de excedentes. El uso no regulado de la biomasa puede desequilibrar el agrosistema con el agotamiento de los suelos y la biodiversidad, por la sobre explotación. El conocimiento de las potencialidades endógenas de los residuos generados en la finca no solo permite asegurar su autosuficiencia, sino también alcanzar una extracción que mantenga los ciclos naturales eficientes, para lograr la optimización ambiental con el equilibrio de sus componentes, la mitigación de los riesgos y la resiliencia agrícola.

Se puede resumir que la finca La Esperanza confirma un modelo de autosuficiencia más eficiente que Nuestra Señora que se presenta como uno viable con el ajuste en manejo de residuos, a través del establecimiento de estrategias con bajo costo para fincas grandes para mejorar el reciclajes de los residuos y lograr la menor dependencia de insumos externos: establecer tecnologías, logística y diseño predial que requieren menos manos de obra, como trituradoras manuales para podas (incrementa la eficiencia en un 40%), biodigestores tubulares escalables de modelo salchicha. El manejo espacial para la recolección de los

residuos estableciendo puntos de acopio centralizados cada 5 ha aproximadamente. La capacitación en talleres participativos sobre el manejo y utilización más eficientes de los residuos que contribuya a la autonomía de la finca con mayor cantidad de ha a manejar.

De acuerdo con los resultados, para minimizar estas dificultades encontradas se recomienda como acciones a priorizar dentro de las fincas estudiadas: (I) para el déficit de K, aplicar 0,5 t/ha cenizas de potasio (Canavalia), y así se aprovecha los residuos de tallos regados en los campos, desechado durante la poda utilizado para la comida animal, unido a compost enriquecido con esta ceniza; lo que pudiera incrementar en 0,3 cmol⁺/kg/ año (Paneque, 2002). (II) Baja autosuficiencia de Fósforo (P), se sugiere el uso de roca fosfórica (200 kg /ha) en cultivos claves, puede mejorar aproximadamente entre 5-6 ppm/año. (III) En las fincas se sugiere establecer un modelo más eficiente en la recolección, mantenimiento y procesamiento de los residuos; donde se establece diferentes puntos estratégicos cerca de las zonas donde se originan la mayor cantidad de residuos (La Esperanza 1 pila de composteras estáticas de capacidad aproximada de 5 t/ año que requieren menos manos de obra y/o un biodigestor de 3 m³, si va a cubrir el 100% del estiércol y residuo vegetal generados por separados). Para Nuestra Señora 2 pilas de composteras estáticas de 10 t/año y/o biodigestor de 5 m³ (para cubrir el 30% aproximadamente del estiércol, pues de no buscar estrategia de recolección en esa finca m'as grnde (19 ha), el 25% se puede perder por lo antes explicado). (IV) Introducir en las fincas el uso de un biodigestor pequeño y de bajo costo, para la producción de biogás para procesar 50% de estiércol, ganando en autosuficiencia energética (50%). El otro 50% aprovecharlo para la elaboración de compost con calidad nutricional superior, más enriquecido con biomasa vegetal, fundamentalmente canavalia (cenizas), con posibilidad de escalar cuando se incremente la autosuficiencia en las fincas.

Procedimiento integrado para el manejo sostenibles de nutrientes y residuos en fincas de Mayabeque

Con las recomendaciones derivadas del estudio, se estructuró un procedimiento integral como propuesta a dar soluciones prácticas-adaptativas y de autogestión para el manejo de flujos de nutrientes y el aprovechamiento de residuos endógenos en fincas típicas de la localidad de Mayabeque, que contribuyan a la transición hacia una economía circular autosostenible en el territorio. El diagrama del procedimiento propuesto de retroalimentación y adaptabilidad para el manejo de nutrientes y bioensumos en fincas de Mayabeque se refleja en la Figura 1.

El primer paso se relaciona con realizar un estudio agroecológico de la finca para el diagnóstico y caracterización de las condiciones endógenas en ella. Se desataca el inventario de los residuos orgánicos (identificar tipos, volúmenes y localización de los residuos generados). Análisis de suelos y flujos de nutrientes (evaluar fertilidad,

déficit de nutrientes y ciclos biogeoquímicos actuales). El mapeo de los recursos disponibles (infraestructura, mano de obra, tecnologías locales con bajo costo, prácticas tradicionales).

Paralelamente se complementa con la recopilación de la información mediante entrevistas y talleres participativos con los actores de la finca, para tener una visión general de las potencialidades generales que tiene la finca con los materiales existentes en ella, para su posible utilización.

En el paso 2, es necesario disminuir las brechas de pérdidas de residuos, a través de la articulación de un diseño de un sistema circular adaptado se debe fundamentar en: (I) El aprovechamiento de la mayor cantidad y clasificación de residuos para validar sus aportes nutritivos para garantizar la calidad nutricional y estabilidad del producto; segmentar por tipo (Relación C/N), para la optimización del compostaje y biodigestor en los residuos de estiércol animal y vegetal. (II) Técnicas de procesamiento: compostaje mejorado (introducción de plantas proteicas en forma de cenizas para mejorar la calidad nutricional, uso de biofermentos, lombricultura para acelerar la descomposición, mejoramiento de las técnicas de aereación minimizando el volteo y creación de pilas estáticas a través del uso de los propios troncos de gajos, residuos de podas). Instalación de biodigestores pequeños para la producción de biogas y biofertilizante, de acuerdo a las capacidades de residuos generados en ellas (estiércol con residuos vegetales triturados ricos en C (paja), para llegar a la relación ideal C/N de 20-30:1) y áreas de las fincas. Biochar a través de la pirólisis de residuos leñosos, para mejorar la retención de nutrientes en suelos. Integración agropecuaria con el uso de subproductos en ciclos (estiércol-vegetal-compost-cultivos-residuos de cosechas-alimentación animal).

En el paso 3, consiste en la implementación participativa y autogestión: (I) Priorizar la capacitación a productores (talleres en técnicas de economía circular, estudio agroecológico en fincas para su conocimiento y cuidado medio ambiental fundamentalmente), para lograr su participación activa en el proceso. (II) Prototipos demostrativos (fincas modelo que apliquen el sistema para validar la eficacia). (III) Establecer la adaptación flexible (según el tipo y las condiciones endógenas de cada finca (ganadería, agrícola, mixta).

El paso 4, Necesidad del monitoreo y evaluación de impacto sistémico a partir de: (I) Indicadores claves (reducción de residuos no aprovechados, mejora de la fertilidad del suelo (materia orgánica y balance NPK) y la autosuficiencia energética (si se aplica biogas). (II) La retroalimentación continua (encuestas a productores para ajustar modelo).

El paso 5, plantea la introducción del escalamiento y las réplicas: (I) elaborar guía de buenas prácticas en el trabajo reciclado con residuos en fincas para documentar el proceso para fincas con condiciones similares. (II) lograr en las políticas locales (vincular con cooperativas y programas de desarrollo agrícola en Mayabeque). La retroalimentación continua del procedimiento es clave para su adaptación a

[INICIO]



1. DIAGNÓSTICO PARTICIPATIVO

- Entrevistas Actores y Análisis DAFO
- Mapeo de residuos y recursos



2. DISEÑO DE SOLUCIONES

- Modular producción de Bioensumos Agrícolas (compostaje, Biodigestor, Biochar)
- Adaptación a recursos locales



3. IMPLEMENTACIÓN PILOTO

- Mini factoría de Bioinsumos
- Monitoreo simple de calidad y eficiencia



4. RETROALIMENTACIÓN CONTINUA

- Talleres bimestrales con agricultores
- Registros de problemas/soluciones emergentes
- Ajustes en tiempo real con adecuaciones más viables



5. VALIDACIÓN Y R'EPÍCA

- Guía de buenas prácticas locales
- Escalamiento a fincas con condiciones similares

[FIN/CICIO NUEVO]

Figura 1. Diagrama del procedimiento propuesto de retroalimentación y adaptabilidad para el manejo de nutrientes y bioensumos en fincas de Mayabeque.

las condiciones endógenas del momento en cada finca, asegura la autogestión basada en el aprendizaje local y la flexibilidad y la escalabilidad de la metodología.

Este procedimiento mejorado de retroalimentación y adaptabilidad en las fincas debe fundamentarse en: (I) En el diagnóstico participativo de Co-construcción con productores en talleres comunitarios para identificar con los agricultores tipos y cantidades de residuos generados; prácticas actuales de manejo (qué funciona y qué no), limitaciones (recursos, clima, conocimientos). Mapeo social para localizar junto a los productores los flujos de nutrientes y puntos críticos de pérdidas). (II) Diseño adaptativo del sistema circular, fundamentado en dar soluciones inmediatas según los recursos de cada finca: si son pequeñas recomendado compostaje y lombricultura, con ganado (biodigestores + uso de biofertilizantes), con exceso de biomasa leñosa (biochar + mulch). Prototipos flexibles probando combinaciones (ej. compost + biochar) y ajustar según resultados. (III) Implementación con monitoreo participativos: (a) Registros colaborativos (cuadernos de campo compartidos (productores + técnicos) para documentar el tiempo de descomposición de los residuos, respuesta de los cultivos a los bioensumos,

comportamientos de las plagas y enfermedades, ahorro en insumos externos. (b) Indicadores simples (% de residuos valorizados, reducción de costo por autoconsumo de fertilizante, mejora en rendimientos en kg/ha y salud del suelo). (IV) Retroalimentación y Re-diseño interactivo como núcleo de la adaptabilidad: (a) Reuniones bimestrales como ferias de experiencias donde los productores comparten éxitos/fracasos. (b) Ajustes en tiempo real de dificultades. (c) Adaptación a cambios climáticos que pueden llevar a modificar proporciones de residuo en compostaje según su humedad, uso de coberturas (mulch) para retener nutrientes en sequía, consideraciones para el mantenimiento de los residuos durante su almacenamiento para ser procesados, estableciendo cambios en el mismo como procesos de pre-compostaje. (V) Sistematización y réplica contextualizada: Metodologías locales (manuales con soluciones variadas por los propios productores. Establecimiento de redes de intercambio entre productores e investigadores para difundir innovaciones emergentes. (VI) Refuerzo de la adaptabilidad enriquecida con el conocimiento empírico de los productores, responde a las dinámicas locales (clima, tipo de suelo, cultivos prioritarios). Empodera al ser los productores coautores del modelo y no solo receptores. (VII) El ciclo muestra una retroalimentación adaptativa: Diagnóstico-implementación -ajuste -réplica.

Vínculo del procedimiento de retroalimentación adaptativa con los resultados concretos de las fincas la Esperanza y Nuestra Señora

En la [Tabla 7](#) se relaciona los principales problemas identificados en cada finca se sugiere la acción/costo estimado/impacto esperado para su mitigación.

En el diagnóstico participativo ([Tabla 5](#)) y de estimación de la biomasa, [Tabla 6](#) (etapa 1 del procedimiento), se destacó como dificultad principal la subutilización de los residuos endógenos en las fincas; La Esperanza cuenta con aproximadamente el 70% de los residuos de hojas de plátano y estiércol bovino, estaban subutilizados, con suelos con tendencia acidificarse y baja retención de agua. Para ambas fincas el diagnóstico también reveló que se desaprovechaba más del 50% de los residuos ([tabla 7](#)). Como solución se propone la elaboración de compostaje con hojas de plátano y cáscaras + estiércol + cenizas de canchalia (La Esperanza). En Nuestra Señora existía un exceso de podas de mango, ficus y aguacate, que eran apiladas y quemadas (pérdida de nutrientes en 200 kg/mes de MO). Se propone la tecnología con un biodigestor pequeño, la cual no era considerada por parte de los productores, por su costo y la cantidad de estiércol que no le permitiría compostar; la adición de las pajas y/o podas de mango, aguacate y ficus (tritурados), en proporciones moderadas máximo 20-30% respecto al estiércol animal (mantener rel. C/N entre 25:1 y 35:1), para optimizar la producción de biogas ([tabla 7](#)). Esto conlleva también la introducción de un triturador manual de bajo costo para disminuir el tamaño de las podas.

En la etapa 3 de implementación piloto las estimaciones cuantitativas sugieren que la producción de compost de 2t/ año, reduce en un 30% menos la utilización de fertilizantes químicos. Logra un mejor ajuste del pH y MOS de 1,8 a 3,5% para La Esperanza. Nuestra Señora, puede producir 1,5 m³/d de biogas utilizado en cocina y secado de frutos ([tabla 7](#)). Esta etapa demostró que estos residuos subutilizados se pueden convertir en recursos estratégicos: mejora de la calidad de compost y producción de energía renovable.

En la etapa 4 de retroalimentación y ajuste se evidenció que La Esperanza tenía un compostaje lento en las lluvias, se instauraron techado móvil con plástico reciclado, reduciéndose el tiempo de compostaje de 90d a 60d, aunque no la cantidad esperada. El tipo de biomasa a poder utilizar podría que en el biodigestor existiera sedimentos, lo que se sugiere realizar un filtro artesanal de piedras y malla para utilizarlo en la finca con mayor vida útil del sistema. Estos resultados sugirieron introducir nuevamente en el proceso la retroalimentación en el paso 4, con la participación de los actores y productores locales, demostrando nuevamente su importancia.

En la etapa 5 de validación y réplica del modelo, sugiere la escalabilidad del proceso de aprovechamiento viable de los residuos endógenos generados en las fincas para lograr la autosuficiencia y que el sistema es adaptable a las prioridades locales. En la Esperanza los residuos aprovechados a un 80% con autosuficiencia nutricional de 65% el ahorro anual se estima que sea de 1200 USD. Nuestra Señora, con 70% de los residuos aprovechados y autosuficiencia nutricional de 50%, se estima un ahorro anual de 950 USD ([Tabla 7](#)).

El análisis de la [Tabla 7](#), permite también comparar la inversión con la estimación de los beneficios claves que pueden ocasionar las acciones propuestas para estas fincas. Para La Esperanza la inversión total tendría un costo aproximado de \$ 485 USD con beneficios claves como el cierre de brechas de pérdidas de nutrientes como el K, unido a la autosuficiencia en la alimentación animal que se incrementa en un 95%. En el caso de la finca Nuestra Señora, la inversión total sería de \$ 1280 USD aproximadamente con beneficios claves en la reducción ≈ 50 % en déficit de N y K con manejo más eficiente de residuo a gran escala.

En ambas fincas es imprescindible para desarrollar estos modelos autosostenibles los talleres participativos, fundamentalmente en las temáticas de introducción de tecnologías de bajo costo que permitan la autosostenibilidad de la finca como en el compostaje acelerado con mayor calidad nutritiva, el manejo de biodigestores con introducción del residual vegetal con al estiércol y la instalación de Mini- biofactorias para la producción de bioinsumos con el manejo eficiente de los residuos y recursos endógeno de las fincas. Talleres en compostaje acelerado con mayor calidad nutritiva y manejo de biodigestores con introducción del residual vegetal con el estiércol.

Tabla 7. Relación de los principales problemas identificados en cada finca se sugiere la acción/costo estimado/impacto esperado para su mitigación

Área	Problema	Acción	Costo Estimado	Impacto (1-2 años)	esperado
Finca La Esperanza					
Fertilidad	Déficit de K (-100kg/ha en 2023)	Aplicar 500 kg/ha de ceniza de podas de plantas (proteicas)	de \$ 20 USD	Incremento del K disponible en 0,2 cmol ⁺ /kg	
Alimentación	Autosuficiencia animal podría mejorarse	Introducción canvalia 0,5 ha de pasto (incrementar la proteína forrajera)	de \$ 15 USD (semillas)	Incremento de la autosuficiencia a 95%	
Residuos	Reciclaje de residuos al 88% (límite cercano al máximo)	Triturar podas de frutales con máquina manual (Incrementar eficiencia del compostaje)	\$ 150 USD	Reciclaje al 92-95%	
Energía	Mejora de la tecnología con costos bajo para porcesar el residuo	Instalar biodigestores de 5 m ³ (si es para procesar todo el estiércol)	de \$ 300 USD	Generar 3 m ³ de biogas/día (Incremento de la autosuficiencia energética)	
Finca Nuestra Señora.					
Fertilidad	Déficit kg/ha en 2023 N:-175 K:-300	Aplicar 200 kg/ha de Roca fosfórica + compost enriquecido + vegetal	de \$ 80 USD	Incremento del P en 5ppm , disminuye déficit de N 30%	
Alimentación	Autosuficiencia animal al 78%	Sustituir 2ha de pasto natural por King Grass (Incremento de la biomasa forrajera)	\$ 100 USD (semillas)	Incremento de la autosuficiencia a 85%	
Residuos/logística	Reciclaje de residuos al 75% (ineficiencia logística)	Establecer 4 puntos de acopio de residuos (c/5ha) con trituradora m'ovil	de \$ 500 USD	Reciclaje al 85%	
Tecnología	Mejora de la tecnología con costos bajo para porcesar el residuo	Instalar biodigestor de 5 m ³ /modulo animal o uno de 10 m ³ (para procesar todo el estiércol)	de \$ 600 USD	Generar 3 m ³ de biogas/día (Incremento de la autosuficiencia energética)	

El proceso de retroalimentación dentro del procedimiento permitió su flexibilidad sin perder el objetivo central de cerrar los ciclos de nutrientes con los recursos endógenos de las fincas.

CONCLUSIONES

- Las fincas demostraron que la integración de bioensumos mejora la autosuficiencia y reduce la huella de carbono, pero requieren ajustes en el manejo del reciclaje de residuos y balance de nutrientes, fundamentalmente para el potasio y fósforo. El estudio cuantifica la posibilidad de validar eficientemente los residuos endógenos (vegetal y estiércol animal), generados en las fincas para la producción de bioensumos y el impacto de su introducción para la autosuficiencia de las fincas para la transición agroecológica de los procesos productivos.
- Con la aplicación del procedimiento propuesto en las fincas se esperan impactos que se estiman en el intervalo de 1-2 años en un incremento de la autosuficiencia de las mismas entre un 92-95%, mejora de la fertilidad del suelo, al incrementar aproximadamente la disponibilidad de potasio en

0,2 cmol⁺/kg, del fósforo en 5 ppm, disminuyendo el déficit de nitrógeno en un 30%; la autosuficiencia de alimentación del ganado pasaría de un 78% a un 85% aproximadamente; la autosuficiencia general en la finca se estima entre un 95%.

- La estimación de los beneficios en inversión total fue de aproximadamente \$485 USD para La Esperanza y \$1280 USD para Nuestra Señora. La autosuficiencia en la alimentación animal se incrementó en un 95% en la primera finca, mientras que en la segunda se redujo el déficit de N y K en un 50% mediante un manejo más eficiente de residuos.
- Se derivó un procedimiento con carácter adaptativo y viable para fincas típicas locales en Mayabeque.
- Las fincas locales con una composición agropecuaria típica de la región, pueden replicar modelos exitosos de gestión integrada de residuos con diversidad de tecnologías accesibles de bajo costo, como biodigestores y compostaje, integrar en ciclos cerrados los residuos a las cadenas productivas de alimentos y energía renovable; monitoreando los impactos para ajustar las estrategias trazadas. El diseño de ciclos cerrados interconectados de flujos de nutrientes en la reutilización de los

residuos endógenos de las fincas maximizan la autosostenibilidad, reduciendo la dependencia de insumos externos y promueve la economía circular dentro del sistema ecológico.

- Incluir estos modelos en programas de desarrollo rural con incentivos de producción de bioinsumos con bajo costo en fincas locales de la provincia Mayabeque y del territorio nacional con características típicas a las estudiadas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALTIERI, M.A.: “Agroecología: principios y estrategias para diseñar sistemas agrarios sustentables”, *Agroecología: el camino hacia una agricultura sustentable*, 34, 2002.
- AZAPAGIC, A.: “Systems approach to corporate sustainability: a general management framework”, *Process Safety and Environmental Protection*, 81(5): 303-316, 2003, ISSN: 0957-5820.
- BÁEZ, N.; LOK, S.; GÓMEZ, C.: “Determination of the environmental economic value of a tropical typical dairy farm of Mayabeque, Cuba”, *Cuban Journal of Agricultural Science*, 55(2), 2021.
- CASIMIRO, L.: “Bases metodológicas para la resiliencia socioecológica de fincas familiares en Cuba”, 2016.
- CASIMIRO, L.; CASIMIRO, J.A.: “How to make prosperous and sustainable family farming in Cuba a reality”, *Elementa: Science of the Anthropocene*, 6, 2018.
- CHAVE, J.; RÉJOU, M.; BÚRQUEZ, A.; CHIDUMAYO, E.; COLGAN, M.S.; DELITTI, W.B.; DUQUE, A.; EID, T.; FEARNSIDE, P.M.; GOODMAN, R.C.: “Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees”, *Global change biology*, 20(10): 3177-3190, 2014, ISSN: 1354-1013.
- COSTO, L.; NUNEZ, L.; AMPATZIDIS, Y.: “Un nuevo índice de banda visible para estimar valores de NDVI”. Computadoreas y electronica en la agricultura 172. Mayo 2020. ScienceDirect. <https://doi.org/10.1016/compag.2020.105334>.
- DENGSHENG, L.; LU, M.; CHEN, L.: “Un estudio sobre métodos de estimación de biomasa en área basados en teledetecciones en ecosistemas forestales”, *Revista Internacional de la Tierra*, 9(1): 63-105, 2016, DOI: <https://doi.org/10.1080/17538947-2014.990526>.
- DÍAZ, Y.; MENDIOLA, L.; GONZÁLEZ, A.; NAVARRO, Y.; DÍAZ, A.; CHAO, C.: “Biofiltración de efluentes líquidos de la industria petrolera con materiales naturales”, *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 43(1): 12-24, 2022, ISSN: 1680-0338.
- ELIZONDO, J.A.: “Calidad y consumo de morera (*Morus alba*), ramio (*Bohemeria nivea* (L) Gaud) y sorgo negro forrajero (*Sorghum almum*) en cabras.”, *Agronomía mesoamericana*, : 209-213, 2004, ISSN: 2215-3608.
- FAO: *Evaluación de la sostenibilidad en sistemas agropecuarios. Enfoque y metodología*, [en línea], Inst. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), Roma, Italia, 2016, Disponible en: <https://www.fao.org>.
- FAO: *Feed inventory and feed balance*, [en línea], Inst. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), FAO. Animal Feed Resources, Roma, Italia, 2018, Disponible en: <https://openknowledge.fao.org>.
- FAO: *Balance de nutrientes en la Agricultura*, [en línea], Inst. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), Manual de alimentación animal para pequeños productores., Roma, Italia, 2021, Disponible en: <https://openknowledge.fao.org>.
- FAO: *Guía de alimentación de animales para climas tropicales*, [en línea], Inst. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), Roma, Italia, 2022, Disponible en: <https://openknowledge.fao.org>.
- FERNÁNDEZ, D.: *Monitoreo satelital de la resiliencia agrícola en Cuba*, [en línea], Universidad Agraria de La Habana, San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba, Tesis Doctoral, San Jose de las Lajas Mayabeque, Cuba, 2020, Disponible en: <http://tesisrepo.sld.cu/123456789/3456>.
- FUNDORA, L.R.; MARTÍN, G.M.; MIRANDA, I.; RIVERAA, R.A.; DUQUE, Y.R.: “Caracterización agroproductiva de fincas de la provincia Mayabeque, Cuba”, *Pastos y Forrajes*, 47, 2024, ISSN: 0864-0394.
- GONZÁLEZ, L.; PÉREZ, M.; RODRIGUEZ, J.A.: “Evaluación del estrés post ciclónico en cultivos tropicales mediante índices espectrales”, *Boletín técnico del INIVIT*, 15(3): 45-58, 2021, ISSN: 1028-3296, DOI: <https://doi.org/10.20396/boletinivit.v13i3.45-58>.
- GONZÁLEZ, R.: *Bioinsumos a pequeña escala en Cuba*, Inst. Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas, Informe técnico de Introducción de resultados de Investigación, San Jose de las Lajas Mayabeque, CUBA, 2023.
- HERNÁNDEZ, R.: “Recuperación de biomasa vegetal en frutales después de eventos climáticos extremos”, *Revista Cubana de Ciencias Forestales*, 6: 112-125, 2020, ISSN: 2310-3469.
- INCA-CUBA: *Tecnologías de bioinsumos en Cuba. Recomendaciones nutricionales para suelos cubanos*, Inst. Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas, Informe técnico de Introducción de resultados de Investigación, San José de Las Lajas, Mayabeque, Cuba, 2020.
- INCA-CUBA: *Protocolos agroecológicos cubanos*, Inst. Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas, Informe técnico de Introducción de resultados de Investigación, San José de Las Lajas, Mayabeque, Cuba, 2023.
- INIA-CUBA: *Guía de biodigestores para pequeños productores*, Inst. INIA, 2020.
- INIVIT-CUBA: *Requerimientos nutricionales de cultivos tropicales*, Inst. Instituto Nacional de Viandas Tropicales INIVIT, Informe técnico de Introducción de resultados de Investigación, Villa Clara, Cuba, 2023.

- INSMET-CUBA: *Reportes de las Estaciones meteorológicas*, Instituto de Meteorología de Cuba. 2024. <http://www.insmet.cu>.
- IPCC: *Guidelines for national greenhouse gas inventories*, Ed. repared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. Eggleston HS, Buendia L, Miwa K, Ngara T, Tanabe K, editors. Published: IGES, Japan, repared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. Eggleston HS, Buendia L, Miwa K, Ngara T, Tanabe K, editors. Published: IGES, Japan ed., Japan, 2019.
- LÓPEZ, R.; GARCÍA, M.; MARTINEZ, J.: "Impacto de huracanes en la cobertura vegetal, analisis de cambios en el NDVI y mumbrales de resiliencia en ecosistemas tropicales", *Revista Ciencias Ambientales*, 15(2): 45-60, 2020, DOI: <https://doi.org/10.38142/ijesss>.
- MMA-ONU: *Manual de bioensumos para biofábricas de la Asociación de productores agroecológicos de las Islas de Maipo-APADIM, [en línea]*, Inst. Ministerio del Medio ambiente-ONU, Santiago de Chile, Financiado en el marco proyecto GEFSEC ID 5135, Santiago de Chile, Chile, 35 p., Encargada a: Ecodaya consultores, 2021, Disponible en: <https://gefmontana.mma.gob.cl>.
- NC-CUB_{APK}: "Catálogo de Normas Cubanas. APK". 2020. NC:10390,1999. <https://www.cubapk.com>.
- NC-CUB_{APK}: "Catálogo de Normas Cubanas. APK". 2020. NC:39, 1999. <https://www.cubapk.com>.
- NOGUEIRA, D.; MEDINA, A.; MEDINA, Y.E.; EL ASSAFIRI, Y.: "Matriz DAFO y análisis CAME, herramientas de control de gestión: caso de aplicación", *Revista Universidad y Sociedad*, 16(2): 34-45, 2024, ISSN: 2218-3620.
- NORIEGA, A.: *Biofábricas: La experiencia cubana, [en línea]*, Avance Agroindustrial 43-2 EEAOC ed., 44-46 p., 2024, ISBN: 0326-1131, Disponible en: <https://www.eeaoc.gob.ar>.
- OCDE-FAO: *Perspectivas Agrícolas 2020-2029*, Inst. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), Roma, Italia, publisher: OECD Publishing, Paris/Food and Agriculture Organization of the United, 2020.
- PALM, C.A.; GACHENGO, C.N.; DELVE, R.J.; CADISCH, G.; GILLER, K.E.: "Organic inputs for soil fertility management in tropical agroecosystems: application of an organic resource database", *Agriculture, ecosystems & environment*, 83(1-2): 27-42, 2001, ISSN: 0167-8809, DOI: [https://doi.org/10.1016/so167-8809\(96\)01136-2](https://doi.org/10.1016/so167-8809(96)01136-2).
- PANEQUE, V.M.: *Manual de técnicas analíticas para análisis de suelo, foliar, abonos orgánicos y fertilizantes químicos*, Ed. Ediciones INCA, 2002, ISBN: 959-7023-51-2.
- QUIROGA, J.L.: "Bioeconomía: nuevo paradigma para el aprovechamiento de la agrobiodiversidad y los recursos naturales", En: *Conferencia Magistral Universidad Mayor de San Andrés, Sep. 2021*, San Andrés, 2021, DOI: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.13831.37280>.
- RESTREPO, R.: *El ABC de la agricultura orgánica y harina de rocas, [en línea]*, Ed. SIMAS, 1ra Ed.-Managua: SIMAS, 2007 ed., Managua, Nicaragua, 262 p., publisher: Managua. SIMAS. N631.86.R436, 2007, ISBN: 978-99924-55-27-2, Disponible en: <https://www.academia.edu/16385539>.
- RIVERA, R.; FERNÁNDEZ, F.; RUIZ, L.; PÉREZ, E.: *Manejo integración y beneficios del bioestimulante micorrízico Ecomicen la producción agrícola, [en línea]*, Ed. INCA, INCA ed., San Jose de las Lajas Mayabeque, Cuba, 151 p., 2020, ISBN: 978-959-7258-05-6, Disponible en: https://ediciones.inca.edu.cu/files/liboros/benficios_del_Biofertilizante_micorriz96C3%ADzico.pdf
- RODRÍGUEZ, E.: *Tratamiento ecológico de semillas de tomate con agromateriales reciclados*, Universidad Agraria de La Habana, Facultad de Agronomía, San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba, Tesis en opción al título de Máster en Agroecología, San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba, 2022.
- SAN JUAN, Y.I.; RODRÍGUEZ, F.I.R.: "Modelos y herramientas para la vigilancia tecnológica", *Ciencias de la Información*, 47(2): 11-18, 2016, ISSN: 0864-4659.
- SÁNCHEZ, P.A.: *Properties and management of soils in the Tropics*, Ed. Cambridge University Press, vol. Cap.9. Nutrient Cycling and soil Fertility, Cambridge, USA, 2019.
- TAIZ, L.: "Plant physiology and development", 2025, ISSN: 019761423X.
- VILLALPANDA, A.: "Manual guía de buenas prácticas de economía circular para una cadena alimentaria sostenible en Cuba". Research Gate. 2024. Doi: <https://doi.org/10.13140/RG2.2.24785.03683>.
- VILLAREAL, J.; CID, G.M.: "La aplicación de la entrevista semi estructurada en distintas modalidades". 2022 Rev. Hallasgos 21, 7(1) 52- 60. <http://revistas.pudese.edu.ec/hallasgos21/>. DOI: <https://doi.org/10.69890>. ISSN: 2528-7915.
- USGS: "Imágenes Sentinel-2 (ESA) cortesía de Copernicus SCiHub". https://www.usgs.gov/centers/eros/data-citation?qt-science_suport_page_related_con. 2024.