

Caracterización de una Unidad Agrícola Familiar Típica del Páramo de Berlín mediante  
la Implementación del Enfoque del Nexo Agua-Energía-Alimento.

Juan David Burgos Barbosa

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniero Civil

Directora

Isabel Cristina Domínguez Rivera

Dr. In Agriculture, Food and Rural Development University of Newcastle Upon Tyne

Codirector

Edgar Ricardo Oviedo Ocaña

Dr. en ingeniería, área de énfasis ingeniería Sanitaria Y Ambiental Universidad del Valle

Univalle

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánica

Escuela de Ingeniería Civil

Bucaramanga

2026

### **Dedicatoria**

Dedico este logro principalmente a mis padres, por ser mi pilar fundamental y apoyarme desde la infancia en mi crecimiento tanto académico como humano. A mi novia, la ingeniera Leysa, cuyo impulso y apoyo incondicional me motivaron a dar el máximo para culminar con éxito este trabajo. A mis familiares y amigos, por acompañarme con sus buenos deseos a lo largo de mi carrera.

### **Agradecimientos**

A mis directores de trabajo de grado, la Dra. Isabel Cristina Domínguez Rivera y el Dr. Edgar Ricardo Oviedo Ocaña, por su guía constante durante mi pasantía, su rigor académico, su lectura crítica y su orientación indispensable para estructurar y materializar esta investigación. A la familia habitante de la Unidad Agrícola Familiar en el Páramo de Berlín, por abrirme las puertas de su hogar y de su parcela. Su hospitalidad, su valioso tiempo y su disposición para compartir sus conocimientos empíricos sobre el territorio hicieron posible la recolección de los datos primarios que fundamentan este proyecto. A mis profesores de la Universidad Industrial de Santander (UIS), por compartir a lo largo de estos años los conocimientos, las herramientas y la vocación que hoy me permiten culminar esta etapa y convertirme en ingeniero civil.

## Tabla de Contenido

|                                                                                                                                                                                                                                     | <b>Pág.</b> |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| Introducción .....                                                                                                                                                                                                                  | 13          |
| 1. Objetivos .....                                                                                                                                                                                                                  | 15          |
| 1.1 Objetivo General .....                                                                                                                                                                                                          | 15          |
| 1.2 Objetivos Específicos.....                                                                                                                                                                                                      | 15          |
| 2. Desarrollo de la pasantía .....                                                                                                                                                                                                  | 16          |
| 2.1 Materiales.....                                                                                                                                                                                                                 | 16          |
| 2.2 Datos o información utilizada.....                                                                                                                                                                                              | 16          |
| 2.3 Procedimiento metodológico .....                                                                                                                                                                                                | 18          |
| 2.3.1 Definición y descripción de una Unidad Agrícola Familiar típica del páramo de Berlín,<br>identificando sus principales componentes y flujos de recursos y residuos. ....                                                      | 18          |
| 2.3.2 Propuesta de un modelo que integre variables e indicadores para representar el nexo agua-<br>energía-alimentos en viviendas rurales, aplicable al contexto de las Unidades Agrícolas<br>Familiares del páramo de Berlín. .... | 18          |
| 2.3.3 Aplicación del modelo propuesto en una Unidad Agrícola Familiar del páramo de Berlín para<br>evaluar los flujos de recursos y residuos bajo el enfoque del nexo agua-energía-alimentos.<br>.....                              | 20          |
| 2.4 Métodos de análisis de datos.....                                                                                                                                                                                               | 22          |
| 2.5 Resultados .....                                                                                                                                                                                                                | 23          |
| 2.5.1 La Unidad Agrícola Familiar típica del páramo de Berlín .....                                                                                                                                                                 | 23          |
| 2.5.2 Propuesta de modelo integrado para el Nexo WEF .....                                                                                                                                                                          | 25          |
| 2.5.3 Aplicación del modelo propuesto en una Unidad Agrícola Familiar del páramo de Berlín                                                                                                                                          | 29          |

|                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.5.3.1 Perfil General y Productivo de la UAF Evaluada. ....             | 29 |
| 2.5.3.2 Evaluación del Nexo a Escala Productiva (Agrícola).....          | 30 |
| 2.5.3.2.1 Cuantificación de los flujos de entrada (Agua y Energía). .... | 31 |
| 2.5.3.2.2 Cálculo de Salidas y Productividades. ....                     | 32 |
| 2.5.3.2.3 Índice del Nexo Agua-Energía-Alimentos (WEFNI). ....           | 32 |
| 2.5.3.3 Evaluación del Nexo a Escala Doméstica.....                      | 35 |
| 2.5.3.3.1 Módulo del Recurso Hídrico Doméstico. ....                     | 35 |
| 2.5.3.3.2 Módulo del Recurso Energético Doméstico. ....                  | 35 |
| 2.5.3.3.3 Módulo de Alimentación y Residuos Orgánicos. ....              | 36 |
| 2.6 Discusión.....                                                       | 37 |
| 3. Conclusiones .....                                                    | 42 |
| 4. Recomendaciones .....                                                 | 43 |
| Referencias Bibliográficas .....                                         | 45 |
| Apéndices.....                                                           | 48 |

**Lista de Tablas**

|                                                                                                                                                | <b>Pág.</b> |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| <b>Tabla 1</b> Descripción con componentes, flujos y referencias bibliográficas de una UAF típica en el páramo de Berlín.....                  | 24          |
| <b>Tabla 2</b> Tabla de ecuaciones y modelos de análisis para la evaluación del Nexo WEF.....                                                  | 26          |
| <b>Tabla 3</b> Inventario de insumos y recursos operativos por ciclo de cultivo (0.5 ha).....                                                  | 31          |
| <b>Tabla 4</b> Resultados de Productividad Agrícola para el cultivo de Cebolla De rama (0.5 ha) por ciclo de cultivo (3.5 meses) .....         | 32          |
| <b>Tabla 5</b> Límites de normalización adoptados para el sistema productivo de cebolla de rama (0.5 ha) por ciclo de cultivo (3.5 meses)..... | 34          |

**Lista de Figuras**

|                                                                                      | <b>Pág.</b> |
|--------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| <b>Figura 1</b> Esquema conceptual del modelo de evaluación del Nexo WEF .....       | 26          |
| <b>Figura 2</b> Registro fotográfico de la UAF evaluada en el páramo de Berlín ..... | 30          |
| <b>Figura 3</b> Diagrama de flujos de recursos de la UAF evaluada .....              | 37          |

## Glosario

**$CWR_{green}$**  : Requerimiento de agua verde

**$CWR_{blue}$**  : Requerimiento de agua azul

**$ET_{green}$**  : Evapotranspiración del cultivo verde

**$ET_{blue}$**  : Evapotranspiración del cultivo azul

**$W_{Total}$**  : Volumen total de agua consumida ( $m^3$ )

**$A_i$**  : Área sembrada

**$E_{entrada}$**  : Energía total de entrada en el sistema productivo de la UAF (MJ/ha)

**$Q_j$**  : Cantidad o flujo del insumo o recurso  $j$  utilizado en campo

**$EE_j$**  : Equivalente energético específico para el insumo (MJ/unidad)

**$k$**  : Número total de insumos agrícolas directos e indirectos evaluados en el ciclo productivo

**$E_{salida}$**  : Energía total de salida

**$Y_i$**  : Rendimiento del cultivo

**$EE_{salida,i}$**  : Equivalente energético de salida (MJ/kg)

**$B_{neto,i}$**  : Beneficio neto obtenido por la comercialización del cultivo  $i$  en pesos colombianos (\$COP)

**$X_i$**  : Valor normalizado para el indicador  $i$

**$x_i$**  : Valor sin normalizar del indicador  $i$

**$i$**  : Variable

**$j$**  : Variable

**$WEFNI$**  : Índice del Nexo Agua-Energía-Alimentos

**$We_i$** : Consumo diario promedio per cápita para el uso hídrico  $i$ , expresado en litros por persona al día (l/p/d)

**$Fe_i$** : Frecuencia media diaria per cápita del uso final hídrico  $i$  (número de eventos por persona al día)

**$De_i$** : Duración del flujo hídrico durante cada evento del uso final  $i$ , expresada en minutos por evento.

**$Re_i$** : Caudal o tasa de flujo promedio del dispositivo correspondiente al uso final  $i$ , medido en litros por minuto (l/min)

**$Ve_i$** : Cantidad o volumen neto de agua consumido por cada ciclo o evento del uso final  $i$ , expresado en litros por evento

**$W_{ca}$** : Consumo diario promedio per cápita de agua para la preparación general de alimentos, expresado en litros por persona al día (l/p/d)

**$N_c$** : Número de veces al día que se preparan alimentos en el hogar (sesiones/día)

**$W_c$** : Volumen promedio per cápita de agua empleado en cada sesión de cocina (l/p/sesión)

**$GW$** : Volumen total de aguas grises generadas (l/p/d)

**$WW_{sh}$** : Agua residual proveniente del uso de la ducha (l/p/d)

**$WW_{cw}$** : Agua residual proveniente del lavado de ropa (l/p/d)

**$BW$** : Volumen total de aguas negras generadas (l/p/d)

**$WW_c$** : Agua residual de las actividades de la cocina, agrupando el volumen hídrico empleado tanto en la preparación de alimentos como en el lavado de la vajilla y utensilios (l/p/d)

**$WW_{tf}$** : Agua residual de las descargas del inodoro tradicional estimado a partir de parámetros estándar de diseño (l/p/d)

**$E_c$ :** Consumo diario promedio del combustible específico  $c$  (gas o leña) para la cocción general de alimentos en el hogar

**$P_c$ :** Proporción de uso del combustible en la vivienda (establecido en 0.5 para ambas fuentes)

**$H_c$ :** Horas totales diarias dedicadas a la cocción en la estufa (horas/día)

**$E_h$ :** Consumo nominal de combustible por hora de uso del quemador a gas o del fogón de leña

**$E_{ai}$ :** Consumo energético diario per cápita del equipo  $i$  (nevera, lavadora o ducha eléctrica), expresado en kilovatios-hora por persona al día (kWh/p/d)

**$N_{ai}$ :** Cantidad de un mismo equipo en la vivienda (unidades)

**$D_{ai}$ :** Duración promedio diaria de la operación del equipo por persona (horas/p/d)

**$W_{ai}$ :** Potencia eléctrica nominal del equipo respectivo, expresado en vatios (Watt).

**$F$ :** Cantidad diaria neta consumida per cápita de alimentos básicos, medida en gramos por persona al día (g/p/d).

**$N_{hab}$ :** Número total de habitantes permanentes de la vivienda

**$FW$ :** Masa total de residuos orgánicos generados por persona al día (g/p/d)

**$PFW$ :** Porcentaje estandarizado promedio de desperdicio en la etapa de consumo final, adaptado según las bases de datos de referencia regional de la FAO (%)

## Resumen

**Título:** Caracterización de una unidad agrícola familiar típica del páramo de Berlín mediante la implementación del enfoque del nexo agua-energía-alimento.\*

**Autor:** Juan David Burgos Barbosa \*\*

**Palabras Clave:** Nexo WEF, agua, energía, alimentos, Unidad Agrícola Familiar, paramo, Berlín.

**Descripción:** Este trabajo de grado describe la caracterización de una Unidad Agrícola Familiar (UAF) típica del páramo de Berlín mediante la implementación del enfoque del nexo agua-energía-alimento (WEF). El objetivo principal consistió en analizar de forma integral los flujos de recursos bajo este enfoque multidimensional para aportar información académica valiosa que contribuya a la sostenibilidad ecológica y económica del territorio. La metodología contempló el desarrollo de tres fases. Primero, se definió y describió la UAF típica mediante un enfoque descriptivo de tipo documental basado en bases de datos académicas y el repositorio institucional, junto con información primaria obtenida mediante una visita de campo con una entrevista estructurada y aplicada a una familia del sector. Segundo, se estructuró el modelo del nexo WEF seleccionando indicadores pertinentes para el contexto productivo agrícola y la escala doméstica residencial. Tercero, se implementó formalmente el modelo en la unidad de estudio para evaluar las interacciones críticas mediante productividades másicas y económicas de agua y energía, estimando el Índice del Nexo Agua-Energía-Alimentos (WEFNI). Como resultado de la evaluación, a escala productiva se obtuvo un WEFNI de 0.66, evidenciando una sobresaliente eficiencia energética impulsada por la labranza manual, opacada por ineficiencias hídricas severas en el riego y baja rentabilidad económica. A escala doméstica, se cuantificó una demanda hídrica de 95.75 L/persona/día y una dependencia del 50% de leña para cocción. Esta investigación permite fortalecer la comprensión técnica del nexo WEF en ecosistemas estratégicos de alta montaña en Colombia y proporciona una línea base de referencia cuantitativa para la gestión integrada de recursos hídricos, energéticos y alimentarios en el entorno rural a escala doméstica y productiva.

---

\*Caracterización de una unidad agrícola familiar típica del páramo de Berlín mediante la implementación del enfoque del nexo agua-energía-alimento.

\*\* Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Isabel Cristina Domínguez Rivera. Dr. In Agriculture, Food and Rural Development University of Newcastle Upon Tyne. Codirector: Edgar Ricardo Oviedo Ocaña. Dr. en ingeniería, área de énfasis ingeniería Sanitaria Y Ambiental Universidad del Valle Univalle.

### Abstract

**Title:** Characterization of a typical family farming unit in the Berlin páramo through the implementation of the water-energy-food nexus approach.\*

**Author:** Juan David Burgos Barbosa\*\*

**Key Words:** WEF Nexus, water, energy, food, Family Farming Unit, páramo, Berlín.

**Description:** This degree project describes the characterization of a typical Family Agricultural Unit (UAF, for its acronym in Spanish) in the Páramo de Berlín through the implementation of the water-energy-food (WEF) nexus approach. The main objective was to comprehensively analyze resource flows under this multidimensional approach to provide valuable academic information that contributes to the ecological and economic sustainability of the territory. The methodology encompassed the development of three phases. First, the typical UAF was defined and described using a documentary descriptive approach based on academic databases and the institutional repository, along with primary information obtained through a field visit featuring a structured interview applied to a local family. Second, the WEF nexus model was structured by selecting relevant indicators for the agricultural production context and the domestic residential scale. Third, the model was formally implemented in the study unit to evaluate critical interactions through the mass and economic productivities of water and energy, estimating the Water-Energy-Food Nexus Index (WEFNI). As a result of the evaluation, at a productive scale, a WEFNI of 0.66 was obtained, evidencing outstanding energy efficiency driven by manual tillage, overshadowed by severe water inefficiencies in irrigation and low economic profitability. At a domestic scale, a water demand of 95.75 L/person/day and a 50% dependence on firewood for cooking were quantified. This research strengthens the technical understanding of the WEF nexus in strategic high-mountain ecosystems in Colombia and provides a quantitative baseline reference for the integrated management of water, energy, and food resources in the rural environment at a domestic and productive scale.

---

\* Characterization of a typical family farming unit in the Berlin páramo through the implementation of the water-energy-food nexus approach.

\*\* Faculty of Physical-Mechanical Engineering. School of Civil Engineering. Advisor: Isabel Cristina Domínguez Rivera, Ph.D. in Agriculture, Food and Rural Development from the University of Newcastle upon Tyne. Co-advisor: Edgar Ricardo Oviedo Ocaña, Ph.D. in Engineering, emphasis area in Sanitary and Environmental Engineering from Universidad del Valle (Univalle).

## Introducción

A nivel global, la interdependencia de los recursos naturales ha posicionado el nexo agua-energía-alimento (WEF) como un tema de alta relevancia investigativa. El enfoque del nexo WEF ha demostrado su utilidad a nivel internacional para mitigar y optimizar el uso de recursos. Estudios en países como Irak han validado modelos a escala doméstica para estimar demandas hídricas y energéticas (Hussien et al., 2017), mientras que en Irán y España se han aplicado Índices del Nexo (WEFNI) para evaluar la productividad agrícola y optimizar insumos a nivel de finca (Entrena-Barbero et al., 2023; Karamian et al., 2021). En contraste, en América Latina y Colombia la aplicación de este enfoque integral en zonas rurales es todavía incipiente (Torres et al., 2020). Aunque existen investigaciones nacionales sobre interacciones de recursos (Granit, 2022; Restrepo et al., 2024), persiste un vacío en la caracterización detallada de flujos a nivel de las UAF.

En este contexto territorial, el páramo de Berlín enfrenta una fuerte presión ambiental derivada del crecimiento demográfico, deficiencias en saneamiento y la gestión empírica de la agricultura intensiva. En la región predominan las UAF dedicadas al monocultivo de cebolla de rama, operando con riego no tecnificado y un uso desmedido de agroquímicos. Ante la escasez de herramientas de diagnóstico para estas explotaciones, surge el problema de investigación: la necesidad específica de estructurar una línea base técnica que evalúe los flujos del Nexo WEF en las viviendas rurales. La justificación de este diagnóstico es fundamental para visibilizar ineficiencias operativas y facilitar una transición hacia un desarrollo agrícola que garantice la rentabilidad campesina y la sostenibilidad ecológica. Para respaldar esta necesidad, la presente investigación adopta modelos validados internacionalmente y los articula con el marco normativo colombiano, particularmente la Ley de Páramos (*Ley 1930 de 2018 - Gestor Normativo - Función*

*Pública*, s. f.), la cual promueve la reconversión productiva y la conservación integral de estos ecosistemas estratégicos.

Para dar solución a esta problemática, la presente pasantía se desarrolla en el Grupo de Investigación en Recursos Hídricos y Saneamiento Ambiental (GPH) de la Universidad Industrial de Santander (UIS). La investigación se enmarca en la línea de evaluación de servicios hidrológicos, recursos y saneamiento rural en el páramo de Berlín, y se articula al proyecto de caracterización de una Unidad Agrícola Familiar (UAF) típica de este ecosistema mediante la implementación del enfoque del nexo agua-energía-alimento (WEF). En consecuencia, el propósito de este estudio fue analizar integralmente los flujos de recursos de una finca representativa, aplicando un modelo matemático de indicadores a escala agrícola y doméstica, mediante un enfoque metodológico mixto que integró revisión documental y recolección de información primaria en campo.

## **1. Objetivos**

### **1.1 Objetivo General**

Caracterizar una unidad agrícola familiar típica del páramo de Berlín con sus flujos de recursos y residuos bajo el enfoque del nexo agua-energía-alimento.

### **1.2 Objetivos Específicos**

Definir y describir una Unidad Agrícola Familiar típica del páramo de Berlín, identificando sus principales componentes y flujos de recursos y residuos.

Proponer un modelo que integre variables e indicadores para representar el nexo agua-energía-alimentos en viviendas rurales, aplicable al contexto de las Unidades Agrícolas Familiares del páramo de Berlín.

Aplicar el modelo propuesto en una Unidad Agrícola Familiar del páramo de Berlín para evaluar los flujos de recursos y residuos bajo el enfoque del nexo agua-energía-alimentos.

## **2. Desarrollo de la pasantía**

### **2.1 Materiales**

Para el desarrollo de la investigación y la estructuración del modelo, se emplearon los siguientes materiales y herramientas.

*Bases de datos y repositorios académicos:* La búsqueda bibliográfica de documentos y artículos científicos se realizó mediante el motor académico Google Scholar y el repositorio institucional de la Universidad Industrial de Santander (UIS). Asimismo, se exploraron bases de datos académicas de alto impacto como Web of Science y Scopus, complementadas con el uso de la biblioteca virtual de la universidad y la plataforma SciELO.

*Herramientas informáticas y de software:* Se empleó una hoja de cálculo de Excel para construir una matriz de sistematización. En este documento se documentaron y organizaron los parámetros, definiciones, métodos de recolección y fórmulas de los indicadores evaluados en la revisión de literatura para estructurar el modelo propuesto.

*Instrumento de recolección de información primaria:* Se utilizó un formulario impreso de entrevista estructurada diseñado para la caracterización de la Unidad Agrícola Familiar. Este material permitió registrar directamente en campo la estructura productiva y la información de los flujos de recursos hídricos, energéticos y alimentarios de la familia evaluada.

### **2.2 Datos o información utilizada**

Para la evaluación del modelo del nexo WEF, se requirió la integración de información secundaria teórica y datos primarios recolectados en campo.

*Datos secundarios (Información documental y climática):* se buscó información bibliográfica sobre la composición, características operativas y marco normativo de las UAF en el páramo de Berlín. Se revisaron datos hidrometeorológicos y agronómicos previamente modelados

para la cuenca del río Jordán mediante el software CROPWAT 8.0 y registros de la estación automática de Berlín del IDEAM (código 37015030). Esta información permitió establecer los requerimientos teóricos de agua verde y azul para los cultivos. Coeficientes de equivalencia energética (medidos en MJ/unidad) extraídos de la literatura científica internacional, utilizados para convertir insumos (como horas de mano de obra, kilogramos de fertilizantes, semillas y combustibles) en valores de energía termodinámica. Límites de normalización mínimos y máximos adoptados de la literatura para escalar los indicadores del Índice WEFNI.

*Datos primarios (Información de campo):* Recolectados mediante la aplicación de una entrevista estructurada a una muestra de estudio (n=1) correspondiente a una UAF representativa. Todos los valores reportados a continuación corresponden a datos reales medidos en el predio. Datos demográficos y de tenencia de la tierra, como el número de habitantes (2 personas) y el régimen de arrendamiento de la parcela de 5 ha, donde 0.5 ha destinada al monocultivo de cebolla de rama. Datos de flujos hídricos, incluyendo los tiempos reales de aspersión para el riego agrícola y los consumos diarios per cápita para higiene básica, preparación de alimentos y uso de electrodomésticos (ducha y lavadora). Datos de flujos energéticos productivos, abarcando las horas de labor manual y las cantidades exactas de insumos aplicados por ciclo de cosecha (gallinaza, fertilizante Triple 15 y semillas). Datos de consumo energético doméstico, registrando la proporción de uso de fuentes para cocción (50% gas GLP y 50% leña) y la potencia de los equipos eléctricos. Datos de salidas productivas y alimentación, correspondientes a los kilogramos (kg) de cebolla cosechados estandarizados por ciclo, y la ingesta neta diaria de alimentos básicos (libras/día) del hogar. Datos económicos directos sobre los costos de producción y la ganancia neta estimada obtenida de la comercialización de la cosecha, necesarios para las productividades económicas del agua y la energía.

## **2.3 Procedimiento metodológico**

### ***2.3.1 Definición y descripción de una Unidad Agrícola Familiar típica del páramo de Berlín, identificando sus principales componentes y flujos de recursos y residuos.***

La investigación adoptó un enfoque descriptivo y cualitativo de tipo documental, basado en la revisión de bases de datos académicas y técnicas relacionadas con las UAF y el páramo de Berlín. La búsqueda bibliográfica se realizó en el repositorio de la UIS, que registra estudios previos en la zona de interés, así como en el motor académico Google Scholar. Asimismo, se exploraron bases de datos como Web of Science y Scopus.

Se emplearon términos de búsqueda como “Unidad Agrícola Familiar”, “UAF”, “Páramo de Berlín”, "Family Farming Unit". En total, se seleccionaron 6 documentos de referencia técnica. Dado el enfoque del objetivo, el tratamiento de la información no contempló un análisis estadístico; por el contrario, los documentos seleccionados fueron analizados mediante una lectura crítica y resumidos para identificar aspectos relacionados con la composición y características de las UAF en el páramo de Berlín, condiciones ambientales y marco normativo del sector de estudio para luego condensar la información en este documento.

### ***2.3.2 Propuesta de un modelo que integre variables e indicadores para representar el nexo agua-energía-alimentos en viviendas rurales, aplicable al contexto de las Unidades Agrícolas Familiares del páramo de Berlín.***

Para el diseño y análisis del modelo del Nexo WEF, se emplearon las fuentes de información bibliográfica mencionadas anteriormente, priorizando estudios científicos sobre el nexo. Con el objetivo de fundamentar la selección de variables e indicadores del estudio, y diferenciándose de la primera búsqueda documental enfocada en las UAF, esta segunda revisión de literatura metodológica se ejecutó en tres fases:

- Búsqueda y selección: Para esta etapa se emplearon ecuaciones de búsqueda y palabras clave específicas como "Water-Energy-Food Nexus", "("Water-Energy-Food Nexus") AND ("Colombia")", y "("Water-Energy-Food Nexus") AND ("family farming")". Con esto, Se realizó un filtrado inicial de los artículos científicos identificados, seleccionando los más pertinentes para el contexto de estudio mediante el análisis de sus títulos y resúmenes.
- Revisión exhaustiva: Los estudios que superaron el tamizaje inicial fueron leídos a texto completo para comprender a profundidad las metodologías de evaluación del nexo implementadas por diferentes autores.
- Sistematización de indicadores: Para consolidar la información, se construyó una matriz en hoja de cálculo de Excel en la cual se documentaron los siguientes parámetros por cada artículo revisado:
  - los indicadores utilizados en el artículo.
  - la definición o aspecto exacto que evalúa cada indicador.
  - los métodos empleados para la recolección de la información para el desarrollo del indicador.
  - las metodologías o fórmulas para su cálculo.
  - la referencia de los autores.

Esta consolidación metodológica permitió filtrar y seleccionar de manera objetiva los indicadores y variables que conforman la estructura del modelo propuesto para las UAF.

Como paso final de esta metodología, y para consolidar la estructura de evaluación, se referenciaron y adaptaron los marcos de modelación propuestos por Karamian et al. (2021) para la escala productiva agrícola, el cual cuantifica las productividades másicas y económicas

integrándolas en un Índice del Nexo - WEFNI y Hussien et al. (2017) para la escala doméstica el cual evalúa los flujos físicos diarios per cápita de recursos hídricos, energéticos y orgánicos en el hogar. Al carecer de un marco teórico por restricciones de formato, la formulación matemática detallada de ambos modelos se incluyó en el Apéndice B para garantizar la replicabilidad del estudio. La integración conceptual de ambos enfoques y el detalle de las ecuaciones matemáticas seleccionadas se presentan como resultado de esta revisión en la sección 2.4.2.

### ***2.3.3 Aplicación del modelo propuesto en una Unidad Agrícola Familiar del páramo de Berlín para evaluar los flujos de recursos y residuos bajo el enfoque del nexo agua-energía-alimentos.***

La aplicación de la propuesta metodológica consistió en la estructuración de dos modelos de evaluación independientes. Para la escala productiva agrícola, se adoptó el modelo propuesto por Karamian et al. (2021), mientras que para la escala doméstica se implementó el modelo de Hussien et al. (2017). La elección de ambos esquemas se fundamentó en que permiten una evaluación completa del nexo, su aplicación resulta sencilla por su escalabilidad a las actividades propias de una UAF, y los datos necesarios para la obtención de sus indicadores eran viables de conseguir mediante literatura científica y recolección primaria de información en campo.

A diferencia de la primera fase (cuyo alcance fue netamente teórico y documental), para llevar este modelo matemático a la práctica se diseñó una entrevista estructurada (Apéndice A). Este instrumento tradujo los requerimientos de ambos modelos en preguntas prácticas medibles, permitiendo capturar las variables operativas, parámetros cuantitativos y flujos reales de la muestra (n=1) necesarios para alimentar las ecuaciones, datos que la revisión bibliográfica no proveía a nivel de hogar.

La recolección de información se llevó a cabo integrando dos fuentes. Por un lado, se recopilaron los datos técnicos necesarios a partir de estudios previos en la zona. Por otro lado, y

previo a la firma de un consentimiento informado que garantizó el manejo anónimo y netamente académico de los datos, se realizó una visita de campo en junio de 2026 que incluyó la observación directa del predio y la aplicación de una entrevista a la familia, con el propósito de caracterizar su estructura real y obtener los flujos de recursos para alimentar las ecuaciones de ambos modelos.

Para la estimación del consumo de agua, se realizó la revisión de información en el repositorio de la UIS, priorizando trabajos desarrollados en la zona de estudio que reportaran requerimientos hídricos de cultivos y sistemas pecuarios asociados a la UAF. Adicionalmente, se incorporó información primaria mediante el diálogo directo en campo con los productores, con los que se identificaron los volúmenes de agua utilizados en prácticas de riego o en uso pecuario.

Para la estimación de la producción másica, a través de la misma entrevista se indagó por la cantidad producida (kg) en periodos mensuales. En aquellos casos en los que no se dispuso de esta información, la producción se estimó a partir de los ciclos de cosecha reportados, permitiendo su conversión a una base mensual o anual, con el fin de garantizar la comparabilidad entre indicadores, donde los resultados se estandarizaron en una misma unidad temporal.

La productividad económica se estimó combinando ambas fuentes, otorgando un peso principal a la información primaria recopilada durante la entrevista, en la cual el productor suministró los datos sobre los costos operativos y los ingresos netos de la UAF. Posteriormente, estos datos se contrastaron con información secundaria sobre precios de referencia del mercado local extraída de la revisión bibliográfica para validar su coherencia, considerando que la literatura disponible no detalla la totalidad de los costos específicos de producción.

## 2.4 Métodos de análisis de datos

El procesamiento de la información recopilada se fundamentó en dos marcos de modelación matemática que permiten evaluar de forma integral y multidimensional los flujos del nexo WEF.

Para la escala productiva agrícola, se adoptó la metodología desarrollada por Karamian et al. (2021). Este enfoque permite cuantificar los requerimientos hídricos del cultivo segregando la precipitación efectiva (agua verde) del volumen de riego aplicado (agua azul), calculados mediante balances de evapotranspiración. Asimismo, evalúa el balance termodinámico de la parcela al contabilizar de forma independiente la energía total de entrada que agrupa los equivalentes energéticos en MJ/unidad de las semillas, la mano de obra, los abonos y los fertilizantes frente a la energía química de salida almacenada en el rendimiento masivo de la cosecha. A partir de estos insumos y salidas, se calculan las productividades másicas ( $\text{kg}/\text{m}^3$  y  $\text{kg}/\text{MJ}$ ) y económicas ( $\text{COP}/\text{m}^3$  y  $\text{COP}/\text{MJ}$ ) del sistema. Finalmente, para unificar estas variables de distinta magnitud, se aplica una normalización mínimo-máximo y se determina un Índice del Nexo (WEFNI) mediante la ponderación estandarizada por coeficientes fijos de expertos, valores preestablecidos y validados en la metodología original de Karamian et al., 2021.

Por su parte, para la evaluación a escala doméstica residencial, se implementó el modelo integrado propuesto por Hussien et al. (2017). Este sistema vincula las demandas cotidianas del hogar a través de tres módulos esenciales: el recurso hídrico, que calcula los consumos per cápita para higiene corporal, lavado textil y preparación de alimentos, además de segregar el caudal vertido hacia el saneamiento en aguas grises y negras; el recurso energético, que modela el consumo de combustibles para la cocción de alimentos y el gasto derivado de los electrodomésticos activos; y el módulo de alimentación y residuos, que cuantifica la ingesta diaria

neta de productos básicos locales y estima la masa de residuos orgánicos generados mediante un factor regional de desperdicio del 6% adaptado de las directrices de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) (Cederberg & Sonesson, 2011; Hussien et al., 2017). Es importante precisar que, a diferencia de la escala productiva agrícola, el modelo de Hussien et al. (2017) para la escala doméstica no contempla la formulación de un índice adimensional único (WEFNI). Su objetivo en el entorno residencial no es evaluar rentabilidad o eficiencia productiva, sino cuantificar los flujos físicos para establecer una línea base de las presiones que ejerce el hogar sobre los recursos.

Una vez cuantificadas las variables de entrada, salidas y productividades de la escala agrícola, los resultados brutos se someten a la normalización mínimo-máximo previamente mencionada. Este paso permite escalar las unidades heterogéneas a un rango adimensional entre 0 y 1, comparándolas con umbrales teóricos extraídos de la literatura para prácticas agrícolas equivalentes. A partir de esto, se calcula el Índice WEFNI mediante factores de ponderación, lo que permite emitir un juicio cuantitativo sobre la sustentabilidad operativa del sistema productivo. Por su parte, los resultados del módulo doméstico se analizan de forma directa para establecer la línea base de consumo y presión sobre los recursos del hogar.

## **2.5 Resultados**

### ***2.5.1 La Unidad Agrícola Familiar típica del páramo de Berlín***

A partir de la revisión documental sistematizada, se logró caracterizar el perfil de una UAF representativa del páramo de Berlín, dando respuesta al primer objetivo específico. En este ecosistema de alta montaña, la UAF no se define por una extensión de tierra fija, sino por ser un área calculada para garantizar la viabilidad económica y el sustento familiar. Operativamente, estas unidades funcionan bajo condiciones de vulnerabilidad socioambiental, marcadas por un rezago

tecnológico y una gestión desregulada de los recursos naturales. El desarrollo extenso de esta revisión bibliográfica y la descripción detallada de cada componente pueden consultarse en el Apéndice B del presente documento. Cabe destacar que para definir las características de esta UAF típica, los estudios referenciados abarcan muestras que van desde la evaluación de 1 predio (Domínguez-Rivera et al., 2026) hasta diagnósticos de 32 y 85 unidades familiares (Rey-Romero et al., 2026; Ortiz Pico y Bustos Leon, 2018). En la Tabla 1 se consolida integralmente la configuración espacial y demográfica de estos predios, así como los flujos empíricos de entradas y salidas documentados por la literatura, los cuales definen su modelo operativo característico.

**Tabla 1**

*Descripción con componentes, flujos y referencias bibliográficas de una UAF típica en el páramo de Berlín.*

| Componente del Sistema                 | Característica y Flujo Operativo Documentado                                                                                                                            | Referencia Bibliográfica                                             |
|----------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| Extensión y Demografía                 | Parcelas altamente fragmentadas con un promedio de $0.50 \pm 0.27$ hectáreas.                                                                                           | Rey-Romero et al. (2026)                                             |
|                                        | Ocupación media de 4 habitantes permanentes por vivienda rural.                                                                                                         | Domínguez-Rivera et al. (2026) y Ortiz Pico y Bustos Leon (2018)     |
| Tenencia y Productividad               | Predominio del modelo de arrendamiento, abarcando el 61% de los productores.                                                                                            | Rey-Romero et al. (2026)                                             |
|                                        | Alta dependencia del monocultivo de cebolla de rama (ciclos de 90 días), complementado con papa negra (240 días), papa amarilla (180 días) y ganadería a pequeña escala | Domínguez-Rivera et al. (2026) y Nieves Barrera y Torres Peña (2020) |
| Flujos de Entrada de Agua e Irrigación | Abastecimiento mediante captación superficial de quebradas por gravedad                                                                                                 | Ortiz Pico y Bustos Leon (2018)                                      |
|                                        | Riego por aspersión aplicado empíricamente, cada 8 días por 2 horas para cebolla, y cada 10 días por 24 horas para papa negra.                                          | Rey-Romero et al. (2026) y Nieves Barrera y Torres Peña (2020)       |

|                                                     |                                                                                                                                                                                    |                                                                                   |
|-----------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| Flujos de<br>Entrada de<br>Energía e<br>Insumos     | La huella hídrica de la cebolla de rama (0.25 ha) demanda por corte entre 63 y 438 m <sup>3</sup> de agua verde y entre 112 y 519 m <sup>3</sup> de agua azul                      | Nieves Barrera y Torres Peña, (2020)                                              |
|                                                     | Cultivos como la papa negra (1.0 ha) alcanzan demandas de 2026 m <sup>3</sup> de agua verde y 2508 m <sup>3</sup> de agua azul.                                                    | Nieves Barrera y Torres Peña, (2020)                                              |
|                                                     | Adecuación del terreno mediante labranza mecanizada (arado de disco) comúnmente contratada a terceros.                                                                             | Rey-Romero et al. (2026).                                                         |
|                                                     | Fertilización intensiva guiada por la tradición, con uso excesivo de gallinaza fresca (15 a 48 toneladas por hectárea) y agroquímicos sintéticos (N-P-K, fungicidas y herbicidas). | Arias Murcia, (2017) y Domínguez-Rivera et al. (2026) y Rey-Romero et al. (2026). |
| Flujos de<br>Salida de<br>Residuos y<br>Saneamiento | Ruptura de la economía circular abandono de biomasa orgánica al aire libre por temor a la propagación de enfermedades fitosanitarias, bloqueando el compostaje.                    | Rey-Romero et al. (2026).                                                         |
|                                                     | Quema o entierro de residuos peligrosos (empaques de venenos y abonos).                                                                                                            | Serrano Acevedo y Amorocho Pérez (2020)                                           |
|                                                     | Carencia de soluciones efectivas para el saneamiento de las aguas residuales humanas.                                                                                              | Domínguez-Rivera et al. (2026).                                                   |

*Fuente:* Elaboración propia a partir de literatura científica.

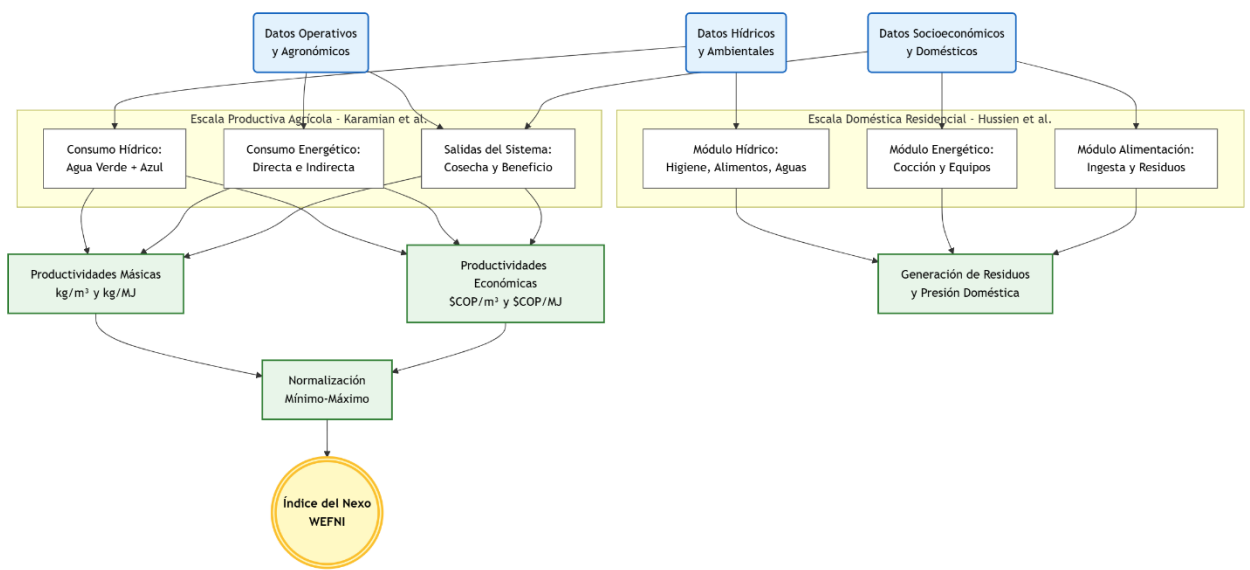
### ***2.5.2 Propuesta de modelo integrado para el Nexo WEF***

Como resultado de la revisión de literatura, se consolidó la estructura conceptual y matemática del modelo adaptado a la UAF. El modelo propuesto se materializa en la articulación complementaria de dos marcos de evaluación independientes (Karamian et al., 2021; Hussien et al., 2017). En lugar de formular indicadores desde cero, el resultado de esta fase fue la adaptación de dichos modelos para que operen simultáneamente bajo el mismo entorno geográfico de la UAF. De esta manera, aunque ambas herramientas mantienen su independencia matemática consolidando la escala agrícola en el índice WEFNI y la doméstica en flujos físicos per cápita, el resultado final es una estructura paralela que evalúa integralmente el nexo. Esta arquitectura

diagnóstica vincula los flujos de la parcela con el metabolismo del hogar campesino. La Figura 1 ilustra su esquema lógico, mostrando la interacción entre las variables de entrada y los módulos de cálculo para determinar las productividades y el Índice del Nexo (WEFNI). Complementariamente, la Tabla 2 detalla las ecuaciones que rigen la evaluación a escala agrícola y doméstica.

Figura 1

Esquema conceptual del modelo de evaluación del Nexo WEF



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2

Tabla de ecuaciones y modelos de análisis para la evaluación del Nexo WEF

| Dimensión / Módulo               | Indicador / Parámetro       | Numeración de la Ecuación | Expresión matemática                         |
|----------------------------------|-----------------------------|---------------------------|----------------------------------------------|
| Agrícola (Karamian et al., 2021) | Requerimiento de agua verde | Ecuación 1                | $CWR_{green} = 10 * \sum_{d=1}^n ET_{green}$ |

---

|                                                                     |             |                                                                                                           |
|---------------------------------------------------------------------|-------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Requerimiento de agua azul                                          | Ecuación 2  | $CWR_{blue} = 10 * \sum_{d=1}^n ET_{blue}$                                                                |
| Volumen total de agua consumida                                     | Ecuación 3  | $W_{Total} = \sum_{i=1}^n (CWR_{green} + CWR_{blue})_i \times (A_i)$                                      |
| Requerimiento de energía total de entrada                           | Ecuación 4  | $E_{entrada} = \sum_{j=1}^k (Q_j \times EE_j)$                                                            |
| Energía total de salida                                             | Ecuación 5  | $E_{salida} = \sum_{i=1}^n (Y_i \times EE_{salida,i})$                                                    |
| Energía neta                                                        | Ecuación 6  | $Energía\ Neta = E_{salida} - E_{entrada}$                                                                |
| Eficiencia energética                                               | Ecuación 7  | $Eficiencia\ Energética = \frac{E_{salida}}{E_{entrada}}$                                                 |
| Productividad másica del agua (kg/m <sup>3</sup> )                  | Ecuación 8  | $\begin{aligned} &Productividad\ Másica\ Agua \\ &= \frac{Y_i}{W_{Total,i}} \end{aligned}$                |
| Productividad másica de la energía (kg/MJ)                          | Ecuación 9  | $\begin{aligned} &Productividad\ Masica\ Energía \\ &= \frac{Y_i}{E_{entrada,i}} \end{aligned}$           |
| Productividad económica del agua (\$COP/ m <sup>3</sup> )           | Ecuación 10 | $\begin{aligned} &Productividad\ Económica\ Agua \\ &= \frac{B_{neto,i}}{W_{Total,i}} \end{aligned}$      |
| Productividad económica de la energía (\$COP /MJ)                   | Ecuación 11 | $\begin{aligned} &Productividad\ Económica\ Energía \\ &= \frac{B_{neto,i}}{E_{entrada,i}} \end{aligned}$ |
| Ecuación de normalización para valores mayores como mejor condición | Ecuación 12 | $X_i = \frac{x_i - Min(x_i)}{Max(x_i) - Min(x_i)}$                                                        |

---

|                                  |                                                                     |             |                                                         |
|----------------------------------|---------------------------------------------------------------------|-------------|---------------------------------------------------------|
|                                  | Ecuación de normalización para valores menores como mejor condición | Ecuación 13 | $X_i = \frac{Max(x_i) - x_i}{Max(x_i) - Min(x_i)}$      |
|                                  | Índice del Nexo Agua-Energía-Alimentos                              | Ecuación 14 | $WEFNI = \frac{\sum_{i=1}^n w_i X_i}{\sum_{i=1}^n w_i}$ |
| Doméstico (Hussien et al., 2017) | Consumo diario hídrico per cápita                                   | Ecuación 15 | $We_i = Fe_i * De_i * Re_i$                             |
|                                  | Consumo diario hídrico per cápita volumen fijo                      | Ecuación 16 | $We_i = Fe_i * Ve_i$                                    |
|                                  | Consumo diario promedio per cápita de agua para alimentos           | Ecuación 17 | $W_{ca} = N_c * W_c$                                    |
|                                  | Volumen total de aguas grises generadas                             | Ecuación 18 | $GW = WW_{sh} + WW_{cw}$                                |
|                                  | Volumen total de aguas residuales generadas                         | Ecuación 19 | $BW = WW_c + WW_{tf}$                                   |
|                                  | Consumo diario promedio del combustible                             | Ecuación 20 | $E_c = P_c \times H_c \times E_h$                       |
|                                  | Consumo energético diario per cápita de electrodomésticos           | Ecuación 21 | $E_{ai} = N_{ai} \times D_{ai} \times W_{ai}$           |

---

|                                                               |             |                                          |
|---------------------------------------------------------------|-------------|------------------------------------------|
| Cantidad diaria neta consumida per cápita de alimentos        | Ecuación 22 | $F = \frac{F_{dia} \times 500}{N_{hab}}$ |
| Masa total de residuos orgánicos generados por persona al día | Ecuación 23 | $FW = PFW * F$                           |

---

*Fuente:* Elaboración propia a partir de Karamian et al. (2021) y Hussien et al. (2017)

*Nota:* La descripción detallada de las variables empleadas se encuentra en el Glosario de este documento, y su respectiva explicación se amplía en el Apéndice B.

### ***2.5.3 Aplicación del modelo propuesto en una Unidad Agrícola Familiar del páramo de Berlín***

**2.5.3.1 Perfil General y Productivo de la UAF Evaluada.** Como punto de partida para la aplicación del modelo, fue necesario establecer las condiciones operativas reales de la muestra específica (n=1). A diferencia de la descripción teórica de la Fase 1, este perfil delimita los parámetros de entrada del predio físico donde se cuantificaron los flujos. La UAF evaluada en el Páramo de Berlín abarca 5 hectáreas y se explota bajo arrendamiento, una modalidad predominante y coherente con las dinámicas socioeconómicas regionales.

Espacial y demográficamente, la vivienda rural de 40 m<sup>2</sup> alberga permanentemente a dos habitantes. Su infraestructura es básica pero estable, construida con paredes de mampostería (ladrillo, bloque y cemento), cubierta de fibrocemento y pisos de baldosa.

El sistema agrícola se enfoca exclusivamente en el monocultivo de cebolla de rama (*Allium fistulosum*), con un área efectiva de 0.5 ha. La preparación del suelo y el arado se realizan de forma totalmente manual, prescindiendo de labranza mecanizada.

La dimensión pecuaria opera a escala de subsistencia y apoyo logístico. El inventario consta de siete gallinas ponedoras (cuyos huevos se destinan al autoconsumo) y un caballo,

empleado como animal de carga para el transporte interno dadas las exigencias topográficas del terreno.

La Figura 2 compila fotografías tomadas durante la visita de campo. En las imágenes se observa el monocultivo de cebolla de rama (*Allium fistulosum*), la vivienda rural de los habitantes, algunos de los desechos que producen y la infraestructura pecuaria para las aves de corral.

### Figura 2

*Registro fotográfico de la UAF evaluada en el páramo de Berlín*



*Fuente:* Elaboración propia.

**2.5.3.2 Evaluación del Nexo a Escala Productiva (Agrícola).** La escala productiva se evaluó en el lote de 0.5 hectáreas de monocultivo de cebolla de rama, con un ciclo de 105 días (3.5 meses).

**2.5.3.2.1 Cuantificación de los flujos de entrada (Agua y Energía).** El abastecimiento hídrico se realiza por captación superficial de una quebrada. Aunque el agricultor reportó riegos por aspersión de dos horas cada tres días, la observación en campo evidenció tiempos superiores, confirmando una gestión empírica. Por ello, para calcular el volumen total consumido, se emplearon los requerimientos hídricos (CWR) modelados para el Páramo de Berlín (Nieves Barrera & Torres Peña, 2020), ajustados al área efectiva de la UAF. De este modo, Para el volumen hídrico total ( $W_{Total}$ ), del cultivo de cebolla de rama ajustados a 0.5 hectáreas, se estimó un consumo combinado (agua verde y azul) de  $1,136 m^3$  por ciclo.

El flujo energético carece de maquinaria con combustible o eléctrica; la preparación del terreno depende exclusivamente de la fuerza humana (480 horas). La fertilización emplea materia orgánica (gallinaza y melaza) y, esporádicamente, sintéticos (Triple 15), destacando la ausencia total de pesticidas o herbicidas. Los datos operativos del balance energético se resumen en la Tabla 3.

**Tabla 3**

*Inventario de insumos y recursos operativos por ciclo de cultivo (0.5 ha)*

| Categoría de Insumo  | Descripción del Recurso                   | Cantidad por Ciclo (3.5 meses) |
|----------------------|-------------------------------------------|--------------------------------|
| Semilla              | Cebolla de rama (100 bultos de 32 kg)     | 3200 kg                        |
| Mano de Obra         | 4 personas, 12 días, 10 hrs/día           | 480 horas                      |
| Abono Orgánico       | Gallinaza (Ajustado al ciclo de 105 días) | 2320 kg (58 bultos de 40 kg)   |
| Fertilizante Químico | Triple 15                                 | 50 kg                          |
| Salida de Producción | Cosecha de Cebolla (400 bultos de 32 kg)  | 12800 kg                       |
| Beneficio Económico  | Ganancia neta estimada de la cosecha      | 9,220,000 COP                  |

*Nota:* \* Datos recolectados mediante entrevista directa.

**2.5.3.2.2 Cálculo de Salidas y Productividades.** La integración de estas entradas frente a las salidas (rendimiento másico e ingresos netos) permitió determinar las productividades de la UAF, cuyos resultados se exponen en la Tabla 4.

**Tabla 4**

*Resultados de Productividad Agrícola para el cultivo de Cebolla De rama (0.5 ha) por ciclo de cultivo (3.5 meses)*

| Indicador                             | Variable        | Resultado | Unidad               |
|---------------------------------------|-----------------|-----------|----------------------|
| Salida Másica                         | $Y_i$           | 12,800    | kg                   |
| Beneficio Neto                        | $B_{neto,i}$    | 9,220,000 | \$COP                |
| Consumo Total de Agua                 | $W_{Total}$     | 1,136     | m <sup>3</sup>       |
| Energía Total de Entrada              | $E_{entrada,i}$ | 4,887     | MJ                   |
| Productividad Másica del Agua         | Ecuación 9      | 11.26     | kg/m <sup>3</sup>    |
| Productividad Másica de la Energía    | Ecuación 10     | 2.61      | kg/MJ                |
| Productividad Económica del Agua      | Ecuación 11     | 8,116     | \$COP/m <sup>3</sup> |
| Productividad Económica de la Energía | Ecuación 12     | 1,886     | \$COP/MJ             |

*Nota sobre el cálculo de  $E_{entrada}$ :* La energía total se compone de la semilla de cebolla (3200 kg × 1,0 MJ/kg), mano de obra (480 h × 1,96 MJ/h), gallinaza (2320 kg × 0,3 MJ/kg) y fertilizante químico (50 kg × 1,1 MJ/kg promedio N-P-K).

**2.5.3.2.3 Índice del Nexo Agua-Energía-Alimentos (WEFNI).** Tras cuantificar las entradas y productividades del cultivo, los parámetros se integran en un indicador adimensional

(WEFNI). Esto exige una normalización matemática para escalar variables heterogéneas ( $\text{m}^3$ , MJ y \$COP) a un rango uniforme entre 0 y 1. Dicho proceso requiere establecer límites teóricos mínimos (Min) y máximos (Max), definidos mediante literatura científica y adaptados a la UAF de 0.5 ha bajo las siguientes consideraciones.

- *Límites de Consumo Hídrico y Energético:* El consumo hídrico mínimo ( $678 \text{ m}^3$ ) se adaptó del menor volumen local reportado para cebolla (Nieves Barrera & Torres Peña, 2020). Los máximos de agua ( $3,720 \text{ m}^3$ ) y energía ( $38,101 \text{ MJ}$ ) se escalaron de sistemas dependientes de agroquímicos y combustibles fósiles (Abdelkader et al., 2022). El mínimo energético ( $4,000 \text{ MJ}$ ) se modeló como piso termodinámico para agricultura de subsistencia sin mecanización.
- *Límites Teóricos de Productividades Másicas:* Los límites inferiores de productividad hídrica ( $4.79 \text{ kg/m}^3$ ) y energética ( $0.47 \text{ kg/MJ}$ ) se adoptaron de escenarios industrializados (Abdelkader et al., 2022). Los máximos se definieron según capacidades óptimas locales:  $18.88 \text{ kg/m}^3$  para agua (escenario más eficiente del páramo) y  $3.00 \text{ kg/MJ}$  para energía (UAF sin mecanización).
- *Límites de Productividad Económica:* Los límites de rentabilidad se estimaron según la volatilidad histórica de precios informada por el propietario (\$15,000 - \$50,000 COP/bulto).

La síntesis de estos parámetros de normalización adoptados para el modelo se presenta en la Tabla 5.

**Tabla 5**

*Límites de normalización adoptados para el sistema productivo de cebolla de rama (0.5 ha) por ciclo de cultivo (3.5 meses)*

| Indicador                         | Límite Mínimo (Min) | Límite Máximo (Max) | Unidad               | Fuente de Referencia                                                                        |
|-----------------------------------|---------------------|---------------------|----------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|
| Consumo Total de Agua             | 678                 | 3,720               | m <sup>3</sup>       | Límite Min: Nieves Barrera y Torres Peña, (2020). Límite Max: Abdelkader et al. (2022).     |
| Energía Total de Entrada          | 4,000               | 38,101              | MJ                   | Límite Min: Estimación teórica local. Límite Max: Abdelkader et al. (2022).                 |
| Productividad Másica (Agua)       | 4.79                | 18.88               | kg/m <sup>3</sup>    | Límite Min: Abdelkader et al. (2022). Límite Max: Cálculo teórico local.                    |
| Productividad Másica (Energía)    | 0.47                | 3.00                | kg/MJ                | Límite Min: Abdelkader et al. (2022). Límite Max: Línea base óptima local (UAF).            |
| Productividad Económica (Agua)    | 2,834               | 15,158              | \$COP/m <sup>3</sup> | Datos primarios: Precios de mercado local (15,000 – 50,000 COP comentados en la entrevista) |
| Productividad Económica (Energía) | 658                 | 3,523               | \$COP/MJ             | Datos primarios: Precios de mercado local (15,000 – 50,000 COP comentados en la entrevista) |

Aplicando los límites de normalización (Tabla 4), los subíndices de uso fueron 0.85 para agua y 0.97 para energía (premiando el menor consumo). Las productividades másicas alcanzaron 0.46 en agua y 0.85 en energía, mientras que ambas productividades económicas registraron 0.43.

La ponderación de estos subíndices arroja un Índice WEFNI de 0.66, ubicando a la UAF en una eficiencia media-alta según Karamian et al. (2021). El sistema presenta una fuerte polarización: destaca su sustentabilidad energética por la labranza manual sin diésel, pero es penalizado por una eficiencia hídrica moderada (tiempos prolongados de aspersión) y un retorno económico condicionado por intermediarios y costos de abonos orgánicos.

**2.5.3.3 Evaluación del Nexo a Escala Doméstica.** Los flujos diarios per cápita de los tres módulos se calcularon según Hussien et al. (2017), adoptando parámetros técnicos estándar para variables sin medición directa.

**2.5.3.3.1 Módulo del Recurso Hídrico Doméstico.** El suministro hídrico por gravedad anula el consumo energético de bombeo. La demanda doméstica se divide en:

*Agua para preparación de alimentos:* Aplicando la Ecuación 17, se reportan 5 sesiones de preparación de alimentos al día, empleando un promedio de 7.5 litros por sesión (rango de 5 a 10 litros, datos de la entrevista). Esto representa un volumen total de 37.5 litros/día, equivalentes a 18.75 l/p/d.

*Higiene y lavado básico:* Para el uso de la ducha, mediante la Ecuación 15, se asume un caudal estándar de 6 L/min. Con una frecuencia de 1 vez al día y una duración estimada de 8 minutos (rango menor a 10 min), el consumo es de 48 L/persona/día. Para el inodoro tradicional y la lavadora se utilizó la Ecuación 16; asumiendo 4 descargas diarias de 6 litros para el inodoro, se estiman 24 l/p/d, y para la lavadora (usada cada 15 días con un volumen de 150 litros por ciclo), esto aporta 5 l/p/d.

*Total, de consumo hídrico:* La demanda doméstica se 95.75 l/p/d, un valor coherente para las zonas de páramo.

*Generación de Aguas Residuales:* Calculadas mediante la Ecuación 18, las aguas grises (GW), provenientes de la ducha y la lavadora, suman 53 l/p/d. De acuerdo con la Ecuación 19, las aguas negras (BW), derivadas del inodoro y la cocina, alcanzan los 42.75 l/p/d.

**2.4.3.3.2 Módulo del Recurso Energético Doméstico.** El perfil energético residencial destaca por la alta demanda térmica en cocción y eléctrica en la ducha.

*Cocción de alimentos:* Evaluado con la Ecuación 20, la vivienda opera con un sistema mixto (50% pipeta GLP y 50% leña) durante aproximadamente 8 horas diarias. Una pipeta de gas de 40 libras (18.14 kg) abastece el hogar por 30 días, con un consumo de 0.3 kg/p/d de GLP (equivalente a 13.8 MJ/p/d asumiendo un poder calorífico de 46 MJ/kg). Para la leña, considerando el tiempo de uso extendido típico de los fogones tradicionales, se asume un consumo estándar rural de 2.5 kg/p/d, aportando aproximadamente 37.5 MJ/p/d.

*Electrodomésticos y calentamiento de agua:* El confort térmico del agua se logra con ducha eléctrica. Utilizando la Ecuación 21, y asumiendo una potencia nominal de 4,000 W para la ducha (8 minutos de uso), el consumo es de 0.53 kWh/p/d. La nevera, con potencia referencial de 150 W, consume 0.60 kWh/p/d, la lavadora (asumiendo 500 W, usada quincenalmente) aporta 0.016 kWh/p/d.

*Total, Eléctrico:* La demanda eléctrica del hogar suma 1,146 kWh/p/d (equivalentes a 4.12 MJ/p/d).

**2.5.3.3.3 Módulo de Alimentación y Residuos Orgánicos.** Este módulo cuantifica el ingreso de biomasa alimentaria y su posterior salida como residuo.

*Consumo de Alimentos:* Mediante la Ecuación 22, la preparación diaria de alimentos básicos se reporta en un promedio de 4.5 libras diarias para toda la vivienda. Esto equivale a una ingesta neta de 2.25 libras por persona, es decir, 1,125 g/p/d.

*Generación de Residuos Orgánicos (FW):* Aplicando la Ecuación 23 con el factor de desperdicio del 6% estandarizado por la FAO para la etapa de consumo final en América Latina (Cederberg & Sonesson, 2011), se generan 67.5 g/p/d de residuos orgánicos por persona.

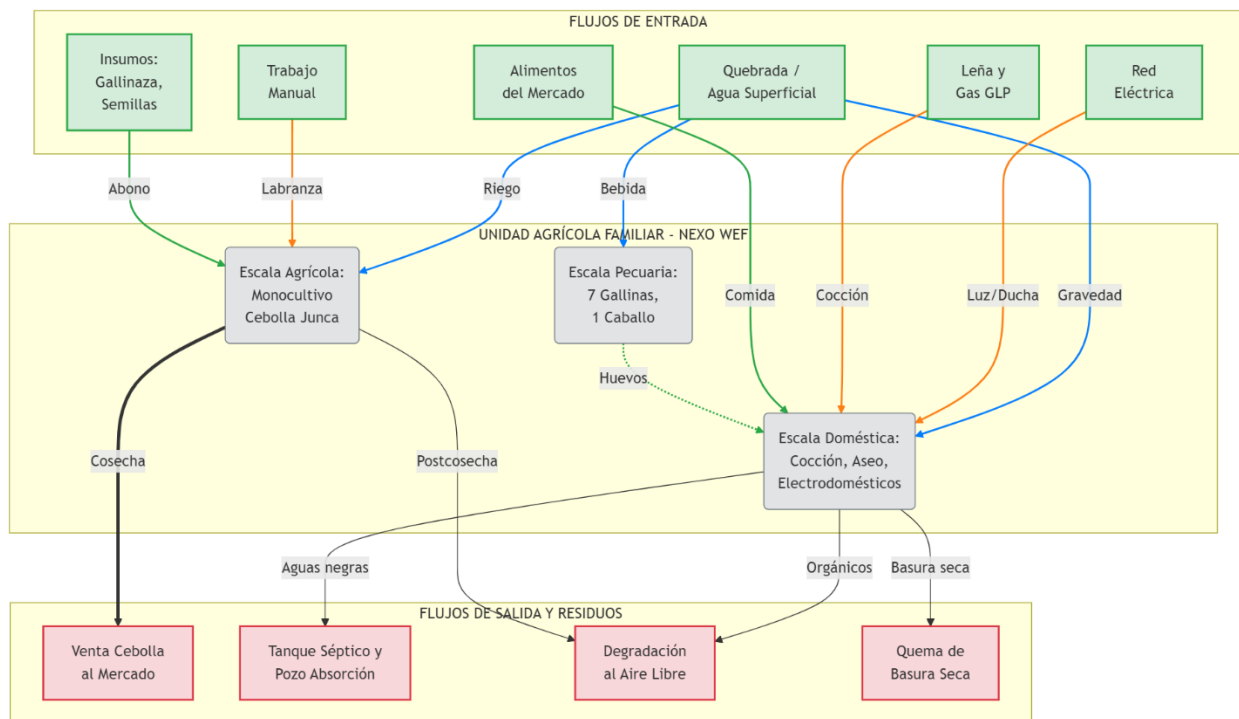
*Disposición final:* El 100% de estos residuos orgánicos se deja al aire libre, lo cual evidencia una ruptura en la circularidad del nexo WEF. Esta biomasa desperdiciada representa una

pérdida de nutrientes que podría reincorporarse al suelo agrícola de la misma UAF mediante compostaje, sustituyendo parcialmente la demanda de gallinaza comprada a terceros.

Finalmente se realizó un diagrama de los flujos de recursos donde se muestran las entradas y salidas que tiene el sistema de la UAF en la escala agrícola, pecuaria y doméstica en la Figura 3.

**Figura 3**

*Diagrama de flujos de recursos de la UAF evaluada*



*Fuente:* Elaboración propia.

## 2.6 Discusión.

La evaluación de la UAF en Berlín revela un contraste entre el aprovechamiento energético y la gestión hídrico-ambiental. El Índice WEFNI (0.66) indica un desempeño medio-alto, impulsado por la nula mecanización de la parcela. Aunque mecanizar podría mejorar la producción, es inviable por la topografía y el área reducida (0.5 ha); además, la introducción de combustibles fósiles desplomaría el índice. Al depender de labranza manual, el predio logra un

subíndice energético (0.97) y productividad másica de energía (0.85) sobresalientes. Sin embargo, este indicador global oculta vulnerabilidades operativas: el subíndice hídrico (0.85) y la productividad másica del agua (0.46) reflejan un riego ineficiente, mientras que las bajas productividades económicas (0.43) evidencian la volatilidad del mercado. Este comportamiento contrasta marcadamente con estudios internacionales de evaluación del nexo. Mientras que autores como Karamian et al. (2021) y Abdelkader et al. (2022) reportan que los sistemas agrícolas altamente tecnificados penalizan su índice WEFNI por el excesivo consumo de energía fósil y optimizan su productividad hídrica, la UAF del páramo muestra un funcionamiento inverso, una alta sustentabilidad energética basada en la mano de obra humana, pero una severa ineficiencia hídrica derivada del rezago tecnológico y optimización del riego.

A pesar de la ventaja energética, el sistema presenta deficiencias en el manejo del recurso hídrico. El suministro de agua, captado de la quebrada sin ningún tipo de potabilización, se emplea para el consumo doméstico como para el riego agrícola. La aplicación del riego por aspersión se realiza con frecuencias empíricas que en la práctica superan los tiempos estimados por el propio agricultor. Este manejo concuerda con lo documentado por Rey-Romero et al. (2026), quienes advierten que las prácticas de riego en el Páramo de Berlín, sumadas a la aplicación de fertilizantes de rápida liberación, incrementan el riesgo de lixiviación de nutrientes y pérdida de eficiencia hídrica. Aunque el predio evita el uso de pesticidas y herbicidas sintéticos lo cual es un indicador positivo para la conservación del suelo, la aplicación intensiva de gallinaza fresca sin un plan de dosificación técnica perpetúa la dependencia de insumos externos.

El análisis del flujo de residuos expone una fractura en la economía circular de la UAF. La totalidad (100%) de los residuos orgánicos postcosecha de cebolla y desperdicios de cocina son abandonados a la degradación al aire libre, mientras que los residuos secos son quemados.

Simultáneamente, el agricultor debe invertir capital en la compra de materia orgánica externa (gallinaza y melaza) para fertilizar el suelo. Como señala Rey-Romero et al. (2026), existe una percepción generalizada entre los campesinos del páramo de que reincorporar residuos de cebolla al cultivo propaga enfermedades fitosanitarias, bloqueando la adopción del compostaje local. Implementar tecnologías de estabilización de biomasa o compostaje permitiría cerrar el ciclo del nexo, transformando el desperdicio doméstico y agrícola en un insumo interno que reduzca los costos de producción y el impacto ambiental.

La viabilidad del nexo WEF está fuertemente condicionada por la estructura socioeconómica de la familia. El sistema evaluado opera bajo un modelo de arrendamiento, dependiendo en un 100% del monocultivo de cebolla de rama y sometido a la alta volatilidad en los precios de venta (entre \$15,000 y \$50,000 COP por bulto). Esta inestabilidad económica dificulta la inversión a largo plazo en tecnologías sostenibles. A esto se suma una profunda desconfianza hacia las entidades del Estado y las Corporaciones Autónomas Regionales, percibidas por la comunidad como actores con intereses políticos o mineros que amenazan su permanencia en el territorio. Este hallazgo valida lo expuesto por Rey-Romero et al. (2026), quien afirma que la participación inefectiva de las partes interesadas y la ausencia de apoyo institucional coherente limitan la transición hacia un manejo sustentable de los recursos. No obstante, la apertura del agricultor para adoptar mejoras tecnológicas propuestas por la academia (la Universidad) representa una ventana de oportunidad para la extensión rural participativa.

A nivel residencial, el modelo de Hussien et al. (2017) permitió concluir que la presión sobre los recursos se agudiza por la energía térmica y el saneamiento básico. Al contrastar la demanda hídrica estimada (95.75 l/p/d) con la del modelo original del autor, el consumo de la UAF resulta moderadamente inferior al de sus casos de estudio urbano; sin embargo, su impacto

ecológico es proporcionalmente mayor debido a la falta de infraestructura de saneamiento. La dependencia de leña para suplir el 50% de las necesidades de cocción con fogones activos durante prolongadas jornadas, evidenció el arraigo de prácticas tradicionales que presionan la cobertura vegetal del ecosistema del páramo. Asimismo, la descarga de aguas negras y grises hacia un tanque séptico y pozo de absorción llama a la necesidad de monitorear la capacidad de infiltración del suelo, considerando que no existen mecanismos de reúso hídrico en la vivienda.

En conjunto, los resultados de dicha UAF demuestran que las optimizaciones en el Nexo en el Páramo de Berlín, como tecnificar el riego para optimizar la eficiencia hídrica e implementar compostaje in situ para reducir abonos externos, no pueden formularse únicamente desde la eficiencia técnica o energética. Cualquier intervención debe tener en cuenta las restricciones económicas del arrendamiento, superar la barrera de desconfianza institucional a través de la academia, y educar sobre la valorización segura de los residuos orgánicos para garantizar la conservación ecosistémica y la dignidad campesina.

Un aspecto crítico es la aplicación de este modelo en el Páramo de Berlín, un ecosistema de alta montaña altamente vulnerable cuya vocación principal es la regulación hídrica, no la agricultura intensiva (Amorocho Pérez et al., 2024; Domínguez-Rivera et al., 2026). Evaluar la "eficiencia" de un monocultivo en esta zona presenta una paradoja frente a la normativa de conservación (Ley 1930 de 2018), ya que estas actividades alteran las dinámicas socioambientales, independientemente de qué tan eficientes sean con el agua o la energía. Para capturar esta realidad, el modelo requiere dos adaptaciones estructurales. Primero, debe evolucionar hacia un enfoque que incluya los servicios del entorno, conocido como Nexo WEF-E (Agua-Energía-Alimentos-Ecosistemas) (Restrepo et al., 2024), integrando indicadores que penalicen prácticas locales dañinas, como el uso de gallinaza fresca no compostada que afecta el suelo y el agua, o la invasión

de la frontera agrícola (Domínguez-Rivera et al., 2026; Rey-Romero et al., 2026). Segundo, sus límites matemáticos de "sostenibilidad" deben basarse en la resiliencia del páramo y no en umbrales de rentabilidad agronómica. Reconocer esto transforma la herramienta propuesta, el modelo deja de justificar o perpetuar la agricultura actual, y se convierte en una línea base diagnóstica indispensable para diseñar los programas de reconversión productiva y restauración ecológica que exige la normatividad (Ley 1930 de 2018).

### 3. Conclusiones

El presente trabajo de grado logró caracterizar una UAF típica del Páramo de Berlín bajo el enfoque multidimensional del nexo WEF. El aporte de esta investigación radica en la entrega de una herramienta de diagnóstico cuantitativa e integrada que va más allá de un análisis aislado de los recursos, proporcionando una línea base técnica para la planificación territorial y la gestión sostenible de los ecosistemas de alta montaña en la región.

En respuesta al primer objetivo específico, se definió y describió una UAF típica del páramo, y se encontró que esta opera bajo un modelo de alta vulnerabilidad socioambiental. La estructura productiva depende en su totalidad del monocultivo de cebolla de rama bajo la figura de arrendamiento, limitando la capacidad de inversión a largo plazo por la volatilidad de precios. Se identificó un manejo empírico y desregulado de los flujos de recursos: el riego se aplica sin criterios técnicos de demanda hídrica, la fertilización depende de la importación de materia orgánica inestable (gallinaza) y existe una ruptura total en la economía circular evidenciada en la quema de residuos sólidos y el abandono de la biomasa orgánica al aire libre.

Para dar cumplimiento al segundo objetivo, se propuso y estructuró un modelo articulado que integra la dinámica agrícola y residencial dentro de una UAF. Se demostró que es posible adaptar metodologías internacionales de evaluación del nexo a la realidad rural colombiana, fusionando el cálculo de productividades másicas y económicas a través de un Índice del Nexo (WEFNI) para la escala productiva, es importante mencionar que la estimación de este índice presentó limitaciones propias del contexto rural, principalmente la ausencia de registros operativos históricos y medidores de caudal en la parcela, lo que exigió respaldar el diagnóstico en los conocimientos empíricos del productor y en literatura de referencia, y con un modelo de cuantificación de flujos per cápita para evaluar las demandas de cocción, energía, alimentación y

saneamiento en la escala doméstica, cuya aplicación se limitó al uso de estimaciones familiares y parámetros teóricos ante la falta de medición directa.

Al aplicar el modelo propuesto en la UAF de estudio para el tercer objetivo, los resultados revelaron una polarización crítica en la eficiencia del sistema. A nivel productivo, se obtuvo un Índice WEFNI de 0.66, el cual refleja una eficiencia energética sobresaliente impulsada por la labranza manual y la ausencia de combustibles fósiles, pero que es opacada por ineficiencias hídricas severas en tiempos prolongados de aspersión y una baja rentabilidad económica frente a la volatilidad del mercado. A nivel doméstico, el modelo cuantificó una demanda hídrica de 95.75 litros/persona/día y evidenció que la matriz energética depende en un 50% del uso de leña para la cocción y del alto consumo eléctrico para el calentamiento de agua, generando presiones directas sobre la cobertura vegetal y la red eléctrica rural.

#### **4. Recomendaciones**

Este trabajo demuestra que las políticas de conservación ambiental en el Páramo de Berlín no pueden desligarse de las realidades económicas y tecnológicas del campesino. Los resultados obtenidos proporcionan información que ayuda a identificar futuras estrategias de intervención, como aquellas enfocadas en la tecnificación del riego, el compostaje in situ para cerrar el ciclo de nutrientes y el fortalecimiento de la confianza entre las instituciones y la comunidad rural.

Finalmente, es necesario reconocer que evaluar la eficiencia de un monocultivo intensivo en el Páramo de Berlín presenta una paradoja frente a su fragilidad ecológica, ya que se trata de un ecosistema vulnerable. Por lo tanto, el modelo propuesto debe adaptarse en futuras investigaciones para incluir el componente de los ecosistemas (Nexo WEF-E), incorporando indicadores que permitan ajustar los límites matemáticos que armonicen la resiliencia del entorno

con los medios de sustento de la población. De este modo, la herramienta dejará de verse como una vía para optimizar o justificar la agricultura actual, convirtiéndose en una línea base diagnóstica indispensable para orientar los planes de reconversión productiva y restauración ambiental que exige la Ley (Ley 1930 de 2018).

### Referencias Bibliográficas

- Abdelkader, M., Zargar, M., Murtazova, K. M.-S., & Nakhaev, M. R. (2022). Life Cycle Assessment of the Cultivation Processes for the Main Vegetable Crops in Southern Egypt. *Agronomy (Basel)*, 12(7), 1527-. <https://doi.org/10.3390/agronomy12071527>
- Amorocho Pérez, A. P., Aceros Gualdrón, J. C., & Serrano Acevedo, N. (2024). Cambios socioambientales en un ecosistema de páramo seco en el nororiente de Colombia. *Trabajo social (Bogotá, Colombia)*, (2), 134-162.
- Arias Murcia, H. (2017). *Auxiliar de investigación en el proyecto para la selección de materiales para el acondicionamiento de los residuos de gallinaza y postcosecha del cultivo de la cebolla junca con miras a su compostaje. Caso: Páramo de Berlín (Santander)*. Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, Ingeniería Civil, Escuela de Ingeniería Civil.
- Cederberg, C., & Sonesson, U. (2011). *Global food losses and food waste: Extent, causes and prevention; study conducted for the International Congress Save Food! at Interpack 2011, [16 - 17 May], Düsseldorf, Germany* (J. Gustavsson, Ed.). Food and Agriculture Organization of the United Nations. International Congress Save Food!
- Domínguez-Rivera, I. C., Patiño-Gutiérrez, S. E., Rey-Romero, D. C., Gómez-Ríos, V. L., Celis-Vargas, A. D., Gómez-Isidro, S., & Oviedo-Ocaña, E. R. (2026). Managerial strategies for the sustainable provision of hydrological services offered by a dry páramo, integrating the paired-catchment approach and the DPSIR framework. *Hydrological Sciences Journal*. <https://doi.org/10.1080/02626667.2025.2605194>
- Entrena-Barbero, E., Rebolledo-Leiva, R., Vásquez-Ibarra, L., Fernández, M., Feijoo, G., González-García, S., & Moreira, M. T. (2023). Water-Energy-Food nexus index proposal

- as a sustainability criterion on dairy farms. *Science of The Total Environment*, 874, 162507. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2023.162507>
- Granit, I. (2022). Microgrids through the Energy-Water-Food Security Nexus in La Guajira, Colombia: Increasing water and food security or jeopardizing groundwater levels? *Energy Research & Social Science*, 93, 102814. <https://doi.org/10.1016/J.ERSS.2022.102814>
- Hussien, W. A., Memon, F. A., & Savic, D. A. (2017). An integrated model to evaluate water-energy-food nexus at a household scale. *Environmental Modelling and Software*, 93, 366-380. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.03.034>
- Karamian, F., Mirakzadeh, A. A., & Azari, A. (2021). The water-energy-food nexus in farming: Managerial insights for a more efficient consumption of agricultural inputs. *Sustainable Production and Consumption*, 27, 1357-1371. <https://doi.org/10.1016/J.SPC.2021.03.008>
- Ley 1930 de 2018—Gestor Normativo—Función Pública. (s. f.). Recuperado 12 de noviembre de 2025, de <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=87764>
- Nieves Barrera, T. M., & Torres Peña, J. M. (2020). *Estimación de la huella hídrica azul y huella hídrica verde de los cultivos de papa y cebolla en una unidad hidrológica ubicada en la cuenca del río Jordán (paramo de Berlín, Santander, Colombia)*. <https://noesis.uis.edu.co/handle/20.500.14071/39914>
- Ortiz Pico, C. D., & Bustos Leon, J. D. (2018). *Alternativas para el mejoramiento de la oferta del recurso hídrico en el sistema de abastecimiento de la vereda El Progreso, en el páramo de Berlín*. Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, Ingeniería Civil, Escuela de Ingeniería Civil.
- Restrepo, J. D., Bottaro, G., Barci, L., Beltrán, L. M., Londoño-Behaine, M., & Masiero, M. (2024). Assessing the Impacts of Nature-Based Solutions on Ecosystem Services: A Water-

- Energy-Food-Ecosystems Nexus Approach in the Nima River Sub-Basin (Colombia). *Forests* 2024, Vol. 15, Page 1852, 15(11), 1852. <https://doi.org/10.3390/F15111852>
- Rey-Romero, D. C., Méndez, Y. L., Daza-Torres, M. C., Domínguez, I., & Oviedo-Ocaña, E. R. (2026). Challenges and opportunities for the sustainable nitrogen management in a páramo agroecosystem: Insights from local soil knowledge and farming practices. *Agroecology and Sustainable Food Systems*, 50(2), 252-287. <https://doi.org/10.1080/21683565.2025.2510357>
- Serrano Acevedo, N., & Amorocho Pérez, A. P. (2020). *Diagnostico participativo de los usos del paisaje de la cuenca del rio Jordán en el páramo de Berlín*. Universidad Industrial de Santander. <https://noesis.uis.edu.co/handle/20.500.14071/40106>
- Torres, C., Gitau, M., Lara-Borrero, J., & Paredes-Cuervo, D. (2020). Framework for water management in the food- energy-water (FEW) nexus in mixed land-use watersheds in Colombia. *Sustainability (Switzerland)*, 12(24), 1-27. <https://doi.org/10.3390/SU122410332>

## **Apéndices**

Apéndice A. Formulario de entrevista estructurada para la caracterización de la Unidad Agrícola Familiar.

Apéndice B. Marco documental de la UAF y formulación matemática del modelo WEF.

Apéndice C. Cálculos del Modelo Nexo WEF UAF Páramo de Berlín.