

**Tabla de Contenido Apéndice B**

|                                                                                                                                                         | <b>Pág.</b> |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| 1. Apéndice B.....                                                                                                                                      | 3           |
| 1.1 Datos de la literatura .....                                                                                                                        | 3           |
| 1.1.1 La Unidad Agrícola Familiar típica del páramo de Berlín. ....                                                                                     | 3           |
| 1.1.1.1 Unidad Agrícola Familiar. ....                                                                                                                  | 3           |
| 1.1.1.2 Descripción de las características de la Unidad Agrícola Familiar típica del páramo de Berlín.....                                              | 4           |
| 1.1.1.2.1 Dimensión Espacial, Demográfica y Social.....                                                                                                 | 5           |
| 1.1.1.2.2 Uso del Suelo, Tenencia y Estructura Productiva.....                                                                                          | 5           |
| 1.1.1.2.3 Gestión del Recurso Hídrico y Saneamiento. ....                                                                                               | 6           |
| 1.1.1.2.4 Prácticas Agrícolas, Mecanización e Insumos.....                                                                                              | 7           |
| 1.1.1.2.5 Generación de Residuos, Impactos y Propuestas de Mitigación. ....                                                                             | 7           |
| 1.1.1.2.6 Consumo hídrico y tiempos de ciclo agrícola en una UAF típica. ....                                                                           | 10          |
| 1.1.1.2.7 Requerimientos energéticos y agronómicos para la producción.....                                                                              | 11          |
| 1.1.1.2.8 Costos de la producción en las UAF típicas de Berlín.....                                                                                     | 12          |
| 1.2 Desarrollo del Modelo para la UAF.....                                                                                                              | 12          |
| 1.2.1 Modelo de nexo agua-energía-alimentos en viviendas rurales, aplicable al contexto de las Unidades Agrícolas Familiares del páramo de Berlín. .... | 12          |
| 1.2.1.1 Dinámica del Nexo en el Sistema de Producción de la Unidad Agrícola Familiar. ....                                                              | 12          |
| 1.2.1.1.1 Cálculo del Consumo Hídrico para las UAF típicas de Berlín. ....                                                                              | 13          |
| 1.2.1.1.2 Modelo de consumo de energía por cultivo para las UAF típicas de Berlín. ....                                                                 | 14          |
| 1.2.1.1.3 Cálculo de Productividades.....                                                                                                               | 18          |

|                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.2.1.2 El Nexo WEF a escala doméstica. ....                           | 22 |
| 1.2.1.2.1 Módulo del Recurso Hídrico Doméstico. ....                   | 23 |
| 1.2.1.2.2 Módulo del Recurso Energético Doméstico. ....                | 26 |
| 2.1.1.2.3 Módulo de Alimentación y Residuos Orgánicos Domésticos. .... | 28 |
| Referencias Bibliográficas .....                                       | 31 |

## 1. Apéndice B

### 1.1 Datos de la literatura

#### 1.1.1 La Unidad Agrícola Familiar típica del páramo de Berlín.

**1.1.1.1 Unidad Agrícola Familiar.** El análisis documental realizado evidencia que, aunque la normativa nacional establece criterios generales para la determinación de la UAF, no se identificaron estudios específicos que definan una UAF adaptada a las condiciones del Páramo de Berlín. En la literatura revisada se señala que una UAF no es una extensión de tierra fija, sino un área calculada para garantizar que una familia campesina sea económicamente viable, viva dignamente y preserve el entorno. De acuerdo con David et al (2023), el cálculo de la extensión se divide en la suma de cinco componentes clave mostrados en la Ecuación 1.

#### Ecuación 1

*Cálculo extensión de terreno UAF*

$$UAF = AMR + REC + VIVRUR + INF + ECE$$

donde:

- AMR (Área Mínima Rentable): Es la cantidad de hectáreas necesarias para que los cultivos generen una ganancia neta mensual de 1.91 Salarios Mínimos Mensuales Legales Vigentes (SMMLV), después de pagar semillas, fertilizantes, obreros y transporte (David et al., 2023).
- REC (Reconocimiento de la Economía del Cuidado): Es un área adicional que reconoce el tiempo y espacio dedicado a las labores del hogar y el bienestar familiar (David et al., 2023).
- VIVRUR (Vivienda Rural): Es el espacio destinado específicamente a una casa digna (David et al., 2023).

- INF (Infraestructura productiva requerida): Es el área para bodegas, cuartos de herramientas, secaderos o establos necesarios para tu producción (David et al., 2023).
- ECE (Conservación de Ecosistemas): Área destinada a la contribución del estado de la conservación de los ecosistemas, en una zona de páramo como Berlín, este componente es importante, pues incluye el área que se debe dejar protegida para mantener el equilibrio del agua y la vegetación nativa (David et al., 2023).

Para obtener esas extensiones se debe analizar los siguientes aspectos, caracterizar la Unidad Física Homogénea (UFH) para esto se debe saber qué tan buena es la tierra, es decir se analizan la pendiente, el clima, la humedad y el tipo de suelo, entonces si el suelo es muy productivo, la UAF será pequeña, si el suelo es pobre o con un clima complicado para la producción, la UAF tendrá que ser más grande para compensar. Luego, seguir con un análisis de mercado donde se investiga a cuánto se venden del cultivo que produce el agricultor en los mercados locales y cuánto cuesta llevarla hasta el mismo. Después hacer una modelación financiera donde se proyecta el negocio a 12 años, si el precio de los cultivos cae o los insumos suben, el área mínima (AMR) debe ajustarse para que siempre la ganancia neta sea de 1.91 SMMLV libres. También hay que analizar un factor de accesibilidad; si la granja está muy lejos de la carretera principal, los costos de transporte suben, lo que significa que se necesita producir más cantidad y por lo tanto la UAF será más extensa (David et al., 2023).

#### **1.1.1.2 Descripción de las características de la Unidad Agrícola Familiar típica del páramo de Berlín.**

La caracterización de la UAF en este ecosistema requiere un análisis integral que vincule las dinámicas socioambientales con los factores críticos del sistema productivo. Para abordar esta complejidad de manera ordenada, a continuación, se describen sus componentes principales a

través de sus dimensiones espaciales, demográficas, sociales y de tenencia de la tierra. Asimismo, se evalúa la gestión del recurso hídrico, el saneamiento, las prácticas agrícolas y el manejo de residuos.

**1.1.1.2.1 Dimensión Espacial, Demográfica y Social.** Estudios de la zona no hablan directamente de una UAF, pero analizan dinámicas en predios que permiten entender cómo se llevan a cabo las prácticas agrícolas y humanas en las fincas de páramo, algo que se podría asimilar a las operaciones que tendría una UAF típica de esta región. Existe un trabajo que analiza un único predio (Domínguez-Rivera et al., 2026), donde predomina la vegetación natural de páramo, pero el 17.7% de su área está dedicada a usos asociados con actividades antrópicas (Domínguez-Rivera et al., 2026). Otro estudio obtuvo información en una unidad Hidrográfica de 207 hectáreas con 36 hogares, de los cuales 32 corresponden a pequeñas fincas (Rey-Romero et al., 2026); de manera similar, en la vereda El Progreso, una de las 20 veredas del páramo de Berlín se contabilizaron aproximadamente 85 viviendas (Ortiz Pico & Bustos Leon, 2018). A nivel demográfico, los asentamientos mantienen una ocupación promedio de cuatro habitantes por vivienda (Domínguez-Rivera et al., 2026; Ortiz Pico & Bustos Leon, 2018). En el ámbito social, los habitantes perciben su entorno de manera positiva, considerándolo saludable, productivo y sin contaminación, mostrando un alto sentido de propiedad e interés en la conservación (Domínguez-Rivera et al., 2026). No obstante, carecen de un reconocimiento explícito del valor de la biodiversidad o de la importancia de implementar prácticas sostenibles, situación agravada por la falta de apoyo gubernamental, la escasez de infraestructura social y un control inadecuado sobre los recursos naturales (Domínguez-Rivera et al., 2026).

**1.1.1.2.2 Uso del Suelo, Tenencia y Estructura Productiva.** La economía local depende estructuralmente de la agricultura intensiva, bajo un modelo de tenencia donde el 61% de los

productores son arrendatarios y el 39% son propietarios de la tierra (Rey-Romero et al., 2026). El monocultivo de cebolla de rama (*Allium fistulosum*) es el principal medio de subsistencia, adoptado desde la década de 1960 debido a su mayor rentabilidad, lo que ha convertido a la región en uno de los principales productores de Colombia (Domínguez-Rivera et al., 2026; Rey-Romero et al., 2026). En sectores como El Progreso, el 95.4% de los encuestados cultiva cebolla, en Berlín dichos cultivos son parcelas con una extensión promedio de  $0.50 \pm 0.27$  hectáreas (Ortiz Pico & Bustos Leon, 2018; Rey-Romero et al., 2026). El uso del suelo se diversifica en menor medida con el cultivo de papa, abarcando entre el 4.7% y el 43% del área según la zona, y con cultivos transitorios como habas, fresas y zanahorias que ocupan un 12% (Ortiz Pico & Bustos Leon, 2018; Rey-Romero et al., 2026). Esta dinámica agrícola se complementa con la ganadería extensiva o a pequeña escala de vacunos, ovinos y aves, orientadas a la producción lechera familiar, presente en el 26% al 58% de los predios, además de la piscicultura en un 4% y la preservación de áreas de conservación en un 17% (Domínguez-Rivera et al., 2026; Ortiz Pico & Bustos Leon, 2018; Rey-Romero et al., 2026).

**1.1.1.2.3 Gestión del Recurso Hídrico y Saneamiento.** El abastecimiento hídrico para consumo y producción depende de fuentes superficiales como la Quebrada Las Puente en la vereda El Progreso (Ortiz Pico & Bustos Leon, 2018). La infraestructura del acueducto está compuesta por una bocatoma de fondo, un desarenador y una red de tuberías de PVC con conexiones domiciliarias; sin embargo, esta red no fue diseñada cumpliendo estándares técnicos, presenta serias deficiencias de construcción, y el agua almacenada se distribuye sin ningún tipo de tratamiento previo (Ortiz Pico & Bustos Leon, 2018). Para la agricultura, dada la alta demanda hídrica de la cebolla, se utiliza riego por aspersión basado exclusivamente en la experiencia de los campesinos y la clasificación local del suelo (Rey-Romero et al., 2026). Sin estimar técnicamente

los requisitos del cultivo, las parcelas se riegan en días sin lluvia durante 6 a 12 horas diarias, en intervalos de 2 a 8 días (Rey-Romero et al., 2026). Paralelamente, los asentamientos humanos carecen de soluciones de saneamiento efectivas, lo que aumenta considerablemente la presión sobre los servicios hidrológicos del ecosistema (Domínguez-Rivera et al., 2026).

**1.1.1.2.4 Prácticas Agrícolas, Mecanización e Insumos.** La preparación del suelo se realiza mediante labranza convencional mecanizada, aprovechando que la topografía de los campos no es muy empinada; se utiliza el arado de disco para eliminar la vegetación superficial y realizar un arado profundo, seguido de labranza rotatoria para alisar el terreno (Rey-Romero et al., 2026). Ante la falta de maquinaria propia, la mayoría de los agricultores debe contratar estos servicios (Rey-Romero et al., 2026). La fertilización es intensiva y combina el uso de gallinaza fresca no compostada considerada un insumo de bajo costo que aporta oligoelementos y nutrientes con agroquímicos sintéticos (Domínguez-Rivera et al., 2026; Rey-Romero et al., 2026). La aplicación de fertilizantes (abonos químicos como 15-15-15, 10-4-14, 10-30-10, urea, potasio, "crecer 500" y platanero) es irregular, depende estrictamente del presupuesto del agricultor y se guía por el consejo de dueños de tiendas o compañeros, sin obedecer a un plan técnico específico (Arias Murcia, 2017; Rey-Romero et al., 2026). Adicionalmente, se aplica cal disuelta en agua a tasas de 13 a 550 kg/ha durante la temporada de lluvias para controlar plagas o reducir la acidez del suelo, junto con líquidos foliares altamente solubles, fungicidas (ej. Vitabax) y herbicidas (ej. Goald) aplicados cada 8 a 12 días sin registro alguno de productos ni fechas (Arias Murcia, 2017; Rey-Romero et al., 2026).

**1.1.1.2.5 Generación de Residuos, Impactos y Propuestas de Mitigación.** La agricultura intensiva genera impactos considerables en el páramo (Domínguez-Rivera et al., 2026). Los residuos orgánicos de los cultivos se apilan junto a los cobertizos de almacenamiento para su

descomposición natural; aunque los agricultores reconocen su potencial como fertilizante, evitan aplicarlos a los campos de cebolla por temor a propagar enfermedades y reducir la productividad (Rey-Romero et al., 2026). En cuanto a los residuos peligrosos, como los empaques de venenos y abonos, la gestión es desigual: ciertos estudios reportan que la falta de un carro recolector provoca que los desechos tóxicos de las fumigaciones sean enterrados o quemados, generando preocupación en la población (Serrano Acevedo & Amorocho Pérez, 2020), mientras que otros indican que en localidades o veredas específicas sí existe una recolección y clasificación formal por parte de la empresa de aseo (Arias Murcia, 2017). Para mitigar estos graves impactos socioambientales, la literatura propone reducir el uso del arado mecánico, optimizar las dosis de fertilizantes promoviendo alternativas seguras, construir sistemas individuales de saneamiento, instalar bebederos para el ganado y proteger las zonas adyacentes a los cuerpos de agua (Domínguez-Rivera et al., 2026).

Para consolidar la información bibliográfica consultada sobre la UAF típica del Páramo de Berlín, la Tabla 1 presenta un resumen de sus características y variables operativas más relevantes. Este cuadro integra datos aproximados sobre aspectos demográficos, vocación agropecuaria, gestión del recurso hídrico, requerimientos de insumos, así como la generación y manejo de residuos derivados de las prácticas agrícolas. Toda esta información se encuentra respaldada por las investigaciones previas realizadas en la zona de estudio.

**Tabla 1**

*Resumen datos aproximados de una UAF típica de Berlín*

| <b>Característica / Variable</b> | <b>Resumen datos aproximados</b> | <b>Autor(es)</b>          |
|----------------------------------|----------------------------------|---------------------------|
| Tamaño promedio de las parcelas. | $0.5 \pm 0.27$ Hectáreas         | (Rey-Romero et al., 2026) |

|                                                                                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                      |
|----------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Número de habitantes por vivienda.                                                     | 4 habitantes                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | (Domínguez-Rivera et al., 2026; Ortiz Pico & Bustos Leon, 2018)                                                      |
| Principales actividades agropecuarias.                                                 | Cultivo de cebolla y papa, ganadería                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | (Domínguez-Rivera et al., 2026; Ortiz Pico & Bustos Leon, 2018; Rey-Romero et al., 2026)                             |
| Área del terreno cultivado según el producto agrícola.                                 | 0.36 ha de cebolla junca                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | (Arias Murcia, 2017)                                                                                                 |
| Fuentes de agua utilizada                                                              | De forma superficial en quebradas                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | (Ortiz Pico & Bustos Leon, 2018)                                                                                     |
| Tipo de riego implementado en los sistemas agrícolas.                                  | Riego por aspersión                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | (Domínguez-Rivera et al., 2026; Rey-Romero et al., 2026)                                                             |
| Tecnologías para el abastecimiento de agua para diferentes usos.                       | Bocatoma de fondo rústica                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | (Ortiz Pico & Bustos Leon, 2018)                                                                                     |
| Insumos agrícolas empleados en el cultivo.                                             | Gallinaza, fertilizantes sintéticos, fertilizantes foliares sintéticos, cal disuelta en agua, platanero, abonos orgánicos como 10-30-10, urea y potasio, crecer 500, vitabax, Goald                                                                                                                                                                                                                                 | (Arias Murcia, 2017; Domínguez-Rivera et al., 2026; Rey-Romero et al., 2026)                                         |
| Producción de residuos sólidos y líquidos.                                             | Residuos de los cultivos, residuos de alimentos y empaques de venenos y abonos,                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | (Arias Murcia, 2017; Rey-Romero et al., 2026; Serrano Acevedo & Amorocho Pérez, 2020)                                |
| Prácticas asociadas a las actividades agrícolas, uso de recursos y manejo de residuos. | Arado con máquina de disco. Los residuos de los cultivos se apilan para que se descompongan naturalmente, también algunos lo usan para compostaje, los residuos de alimentos y empaques de venenos y abonos son recolectados y clasificados para la recolección, otros los queman o entierran. Los residuos de gallinaza se emplean para abonar los cultivos, no se ha encontrado información de residuos del hogar | (Arias Murcia, 2017; Domínguez-Rivera et al., 2026; Rey-Romero et al., 2026; Serrano Acevedo & Amorocho Pérez, 2020) |

**1.1.1.2.6 Consumo hídrico y tiempos de ciclo agrícola en una UAF típica.** Un estudio en el Páramo de Berlín que fue realizado desde septiembre de 2019 a febrero de 2020 dio como resultado el consumo de agua de los cultivos predominantes de la zona, con un índice de huella hídrica, estos cultivos fueron la cebolla junca (*Allium fistulosum*), la papa negra y la papa amarilla (*Solanum phureja*), donde la principal fuente de abasto de los productores de la zona y los alrededores son las quebradas generadas por el balance hídrico positivo del páramo (Nieves Barrera & Torres Peña, 2020).

En su metodología se tomaron datos secundarios del grupo por el Grupo de Investigación en Recursos Hídricos y Saneamiento Ambiental (GPH) de la Universidad Industrial de Santander (UIS) que ha hecho estudios en la zona, además se realizó una encuesta en la zona de estudio, con estos datos y el programa CROPWAT 8.0 encontró las huellas hídricas de agua verde y azul de cada cultivo durante todo el ciclo de siembra y cosecha. Los resultados se resumen en la Tabla 2 (Nieves Barrera & Torres Peña, 2020).

**Tabla 2**

*Datos de las huellas hídricas de los consumos de cebolla junca, papa negra y papa amarilla*

| Cultivo       | Cortes  | fechas de siembra y cosecha | Extensión del cultivo (Hectáreas) | Huella hídrica agua verde (m <sup>3</sup> ) | Huella hídrica agua azul (m <sup>3</sup> ) |
|---------------|---------|-----------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------------|--------------------------------------------|
| Cebolla junca | Corte 1 | 5/08/2019-2/11/2019         | 0,25                              | 415                                         | 177                                        |
|               |         | 5/11/2019-2/02/2020         |                                   | 88                                          | 517                                        |
|               | Corte 2 | 5/09/2019-3/12/2019         | 0,25                              | 438                                         | 336                                        |
|               |         | 5/12/2019-4/03/2020         |                                   | 63                                          | 519                                        |
|               | Corte 3 | 5/07/2019-2/10/2019         | 0,25                              | 227                                         | 112                                        |
|               |         | 5/10/2019-2/01/2020         |                                   | 267                                         | 405                                        |
| Papa negra    | Corte 1 | 5/03/2019-30/10/2019        | 0,50                              | 816                                         | 359                                        |
|               | Corte 2 | 5/05/2019-30/12/2019        | 1,00                              | 2026                                        | 2508                                       |

|               |         |                      |      |      |      |
|---------------|---------|----------------------|------|------|------|
| Papa amarilla | Corte 1 | 5/03/2019-31/08/2019 | 1,00 | 0    | 0    |
|               | Corte 2 | 5/08/2019-31/01/2020 | 1,00 | 2031 | 2082 |

En promedio el cultivo de cebolla junca tiene una duración de 90 días, el de la papa negra 240 días y la papa amarilla un tiempo de 180 días. El estudio también reveló que los productores locales sembraron estos cultivos durante la temporada de lluvias, lo que resulta favorable, ya que reduce la necesidad de riego al aprovechar la disponibilidad natural de agua lluvia. Estos productores empleaban riego por aspersión cada 8 días durante dos horas de manera consecutiva para la cebolla junca, para la papa negra empleaban riego por aspersión cada 10 días durante 24 horas, en el caso de la papa amarilla los campesinos de la zona procuraban su siembra en época de lluvia de tal forma que este cultivo no requiriera riego (Nieves Barrera & Torres Peña, 2020).

**1.1.1.2.7 Requerimientos energéticos y agronómicos para la producción.** El cultivo de cebolla requiere en promedio de 5 obreros por hectárea. Además, se requieren fertilizantes como el platanero y abonos tanto orgánicos como químicos, tales como 10-30-10, urea, potasio y Crecer 500; fungicidas como Vitabax, y para el control de malezas, herbicidas como Goal (Arias Murcia, 2017).

Se usa gallinaza fresca como fertilizante orgánico debido a su bajo costo y a su aporte de nutrientes y microelementos, lo que contribuye al mejoramiento y desarrollo de los cultivos. El 70% de los encuestados en un estudio aplica entre 230 y 437 kg de N/ha, cantidades elevadas en relación con las necesidades del cultivo. Un 30% aplica dosis aún mayores, superando los 900 kg de N/ha, lo que indica un exceso generalizado de N. La aplicación de gallinaza se guía por la tradición más que por análisis de suelo, emplean entre 15 a 48 toneladas de gallinaza por hectárea (Rey-Romero et al., 2026).

**1.1.1.2.8 Costos de la producción en las UAF típicas de Berlín.** Los agricultores adquieren estiércol equino, residuos de frutas, residuos de papa y residuos de cebolla junca, para el compostaje y mejoramiento de los cultivos, en la Tabla 3 se pueden observar los precios y cantidades.

**Tabla 3**

*Precios y cantidades de insumos para compostaje*

| Insumo                    | Precio para su adquisición (\$COP/kg) | Cantidad por mes (kg/mes) |
|---------------------------|---------------------------------------|---------------------------|
| Estiércol equino          | 2000                                  | 50                        |
| Residuos de fruta         | No tiene costo                        | 25                        |
| Residuos de papa          | No tiene costo                        | 30                        |
| Residuos de cebolla junca | 1000                                  | 30                        |

Fuente: Arias Murcia (2017)

## **1.2 Desarrollo del Modelo para la UAF**

### **1.2.1 Modelo de nexo agua-energía-alimentos en viviendas rurales, aplicable al contexto de las Unidades Agrícolas Familiares del páramo de Berlín.**

**1.2.1.1 Dinámica del Nexo en el Sistema de Producción de la Unidad Agrícola Familiar.** Se adoptó un modelo de análisis del nexo WEF en pequeñas unidades agrícolas que incluye indicadores propuestos por Karamian et al., (2021), incluyendo el consumo de agua, definido como la cantidad de agua requerida por los cultivos o animales; el consumo de energía definido como la cantidad de energía consumida. Los indicadores de producción agrícola fueron: productividad másica del agua, la cual se entendió como la cantidad de producto obtenido por unidad de volumen de agua consumida ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ); productividad másica de la energía, definida como la cantidad de producto obtenido por unidad de energía consumida ( $\text{kg}/\text{MJ}$ ); productividad económica del agua, entendida como el beneficio económico neto de ingresos brutos totales menos costos directos totales obtenido por unidad de volumen de agua consumida ( $\$/\text{m}^3$ ); y productividad

económica de la energía, definida como el beneficio económico neto de ingresos brutos totales menos costos directos totales obtenido por unidad de energía consumida (\$/MJ), finalmente, estos valores se normalizaron y se calculó un índice del Nexo WEF mediante la asignación de un peso (a criterio) a cada indicador.

**1.2.1.1.1 Cálculo del Consumo Hídrico para las UAF típicas de Berlín.** Para estimar el consumo hídrico de la UAF en el ecosistema del Páramo de Berlín, se adaptó el componente de agua del índice del Nexo WEF propuesto por Karamian et al., (2021). Este modelo metodológico permite evaluar la sustentabilidad agrícola separando el requerimiento de agua de los cultivos en dos fuentes principales: el agua verde, correspondiente a la precipitación efectiva, y el agua azul, referida al volumen suministrado mediante sistemas de riego (Karamian et al., 2021).

El requerimiento hídrico específico de los cultivos evaluados se calcula integrando las tasas de evapotranspiración mediante las Ecuaciones 2 y 3 (Karamian et al., 2021).

## Ecuación 2

*Requerimiento de agua verde*

$$CWR_{green} = 10 * \sum_{d=1}^n ET_{green}$$

## Ecuación 3

*Requerimiento de agua azul*

$$CWR_{blue} = 10 * \sum_{d=1}^n ET_{blue}$$

donde  $CWR_{green}$  y  $CWR_{blue}$  representan el requerimiento de agua verde y azul respectivamente en metros cúbicos por hectárea ( $m^3/ha$ ), la variable  $n$  equivale al periodo de crecimiento del cultivo, mientras que la constante de 10 se utiliza como factor de conversión geométrica para pasar de una

profundidad de lámina de agua en milímetros (mm) a un volumen a nivel de suelo en metros cúbicos por hectárea (m<sup>3</sup>/ha) (Karamian et al., 2021).

Dado que la evapotranspiración del cultivo ( $ET_{green}$ ) y ( $ET_{blue}$ ) depende estrictamente de las variables climatológicas y edafológicas locales, se utilizaron los coeficientes y requerimientos específicos previamente modelados para la cuenca del Río Jordán del páramo de Berlín por (Nieves Barrera & Torres Peña, 2020). Dicho estudio empleó el modelo de simulación agronómica CROPWAT 8.0 de la FAO y datos oficiales de la estación hidrometeorológica automática de Berlín del IDEAM con código 37015030, para cuantificar la Huella Hídrica Verde y Azul de los cultivos predominantes en la zona: cebolla junca (*Allium fistulosum*), papa negra (*Solanum tuberosum*) y papa amarilla (*Solanum phureja*) (Nieves Barrera & Torres Peña, 2020).

Finalmente, para escalar los requerimientos agronómicos teóricos a la realidad operativa de la UAF, el modelo del nexo incorpora los datos primarios recolectados mediante el instrumento de encuesta aplicado al agricultor. El volumen total de agua consumida en la unidad productiva ( $W_{Total}$ ) se modela sumando los requerimientos hídricos (CWR) de cada cultivo  $i$ , multiplicados por el área sembrada ( $A_i$ ) declarada en campo, con la Ecuación 4:

#### **Ecuación 4**

*Volumen total de agua consumida*

$$W_{Total} = \sum_{i=1}^n (CWR_{green} + CWR_{blue})_i \times (A_i)$$

##### ***1.2.1.1.2 Modelo de consumo de energía por cultivo para las UAF típicas de Berlín.***

Basándose en el modelo propuesto por Karamian et al., (2021), se incluyó la energía directa e indirecta empleada en la producción del cultivo. La energía directa comprende la mano de obra humana, la electricidad, el combustible diésel y la energía del agua utilizada para el riego. Por otra

parte, la energía indirecta incluye la requerida para la producción de fertilizantes, pesticidas, semillas y maquinaria agrícola.

Para cuantificar la energía correspondiente a la salida de producción de la papa (*Solanum tuberosum* y *Solanum phureja*), se adoptó un equivalente energético de 3.60 MJ/kg, este valor se fundamenta en el alto contenido de carbohidratos (almidón) y materia seca presentes en el tubérculo, lo que le otorga una alta densidad energética. De acuerdo con Mohammadi et al., (2008), este coeficiente refleja la energía neta almacenada por cada kilogramo de masa fresca que es cosechada en el sistema agrícola, siendo el estándar utilizado en los análisis de entradas y salidas de energía.

En cuanto a la semilla de papa empleada como insumo dentro de la categoría de energía indirecta, se asignó el mismo equivalente energético de 3.60 MJ/kg. Esta equivalencia se justifica en el método de siembra del cultivo, el cual se realiza mediante propagación vegetativa. En términos físicos y termodinámicos, el tubérculo semilla introducido en el suelo posee la misma composición biológica y densidad energética que el producto final obtenido en la cosecha (Mohammadi et al., 2008).

Para evaluar la salida de producción de la cebolla (*Allium fistulosum*), se determinó un equivalente energético de 1.85 MJ/kg, a diferencia de los tubérculos, esta hortaliza presenta una mayor proporción de humedad (agua) estructural y una menor concentración de materia seca, lo que se traduce en una energía neta inferior por unidad de masa, este coeficiente se adoptó a partir de las evaluaciones de ciclo de vida y balances energéticos estandarizados para cultivos hortícolas de bulbo y rama (Abdelkader et al., 2022).

Para el insumo correspondiente a la semilla botánica de cebolla, se estableció un equivalente energético de 1.00 MJ/kg. Cuantificar los flujos exactos de energía requeridos para la

producción de semillas hortícolas de tamaño reducido representa un desafío en los inventarios de ciclo de vida local. Por lo tanto, se adoptó este coeficiente de uso generalizado en la literatura especializada sobre balances de energía agrícola, el cual permite representar adecuadamente el aporte energético de la semilla al inicio del ciclo productivo (Ozkan et al., 2004).

La Tabla 4 resume la matriz de equivalencias energéticas para la UAF, empleando los coeficientes de (Karamian et al., 2021) para insumos generales. Adicionalmente, para ajustar el modelo a las particularidades del Páramo de Berlín, se integran los valores específicos para semillas y producción de papa y cebolla obtenidos de la literatura especializada (Abdelkader et al., 2022; Mohammadi et al., 2008; Ozkan et al., 2004) expresados en mega julios (MJ).

**Tabla 4**

*Equivalentes energéticos*

| Tipo de energía   | Sub categoría de energía       | Unidad         | Equivalente en (MJ/Unidad) |
|-------------------|--------------------------------|----------------|----------------------------|
| Energía Directa   | Mano de obra humana            | Hora           | 1.96                       |
|                   | Combustible (Diesel, gasolina) | Litro          | 56.31                      |
|                   | Electricidad                   | kWh            | 3.6                        |
|                   | Energía de agua para riego     | m <sup>3</sup> | 1.02                       |
| Energía indirecta | Maquinaria                     | Hora           | 62.7                       |
|                   | Fertilizantes químicos         |                |                            |
|                   | Nitrógeno                      | kg             | 60.6                       |
|                   | Fosfato                        | kg             | 11.1                       |
|                   | Potasio                        | kg             | 6.7                        |
|                   | Estiércol de Corral            | kg             | 0.3                        |
|                   | Pesticidas                     |                |                            |
|                   | Insecticidas                   | kg             | 184.63                     |
|                   | herbicidas                     | kg             | 254.45                     |
|                   | Semillas                       |                |                            |

|                      |                    |    |      |
|----------------------|--------------------|----|------|
|                      | Semilla de Cebolla | kg | 1.00 |
|                      | Semilla de Papa    | kg | 3.60 |
| Salida de Producción | Producción Cebolla | kg | 1.85 |
|                      | Producción Papa    | kg | 3.60 |

Con base en los equivalentes descritos y los datos operativos de la UAF, la cuantificación de la energía total de entrada empleada en el sistema productivo se fundamenta en la suma de los aportes individuales de cada recurso. De esta manera, el requerimiento energético se calcula multiplicando la cantidad consumida de cada insumo por su respectivo equivalente de conversión energética mediante la Ecuación 5.

### Ecuación 5

*Requerimiento de energía total de entrada*

$$E_{entrada} = \sum_{j=1}^k (Q_j \times EE_j)$$

donde:

- $E_{entrada}$ : 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 (ej. kilogramos de nitrógeno, litros de diésel, horas de mano de obra, etc.).
- $EE_j$ : Equivalente energético específico para el insumo  $EE_j$  (MJ/unidad), obtenido de los valores estandarizados en la Tabla 4.
- $k$ : Número total de insumos agrícolas directos e indirectos evaluados en el ciclo productivo.

Por otra parte, la energía total de salida ( $E_{salida}$ ) detallada en la Ecuación 6, corresponde a la energía química almacenada en el producto cosechado. El cálculo independiente de las energías de entrada y salida permite evaluar el balance termodinámico de la UAF mediante dos indicadores

de sustentabilidad agronómica (Karamian et al., 2021), que son la Energía Neta (Ecuación 7) y la Eficiencia Energética (Ecuación 8).

### **Ecuación 6**

*Energía total de salida*

$$E_{salida} = \sum_{i=1}^n (Y_i \times EE_{salida,i})$$

### **Ecuación 7**

*Energía neta*

$$Energía\ Neta = E_{salida} - E_{entrada}$$

### **Ecuación 8**

*Eficiencia energética*

$$Eficiencia\ Energetica = \frac{E_{salida}}{E_{entrada}}$$

donde  $Y_i$  es el rendimiento del cultivo (kg/ha) y  $EE_{salida,i}$  es su equivalente energético (MJ/kg).

Un sistema agrícola se considera sustentable si su Eficiencia Energética es mayor a 1, indicando que produce más energía de la que consume (Mohammadi et al., 2008).

**1.2.1.1.3 Cálculo de Productividades.** Para evaluar la eficiencia del uso de los recursos en la UAF, se estructuró el cálculo de cuatro indicadores de productividad para cada cultivo. Estos indicadores relacionan las salidas del sistema, es decir, los rendimientos másicos e ingresos, con las entradas correspondientes a los consumos de agua y energía (Karamian et al., 2021).

*Productividad Másica:* La productividad másica determina la cantidad de producto físico obtenido por cada unidad de recurso consumido (Karamian et al., 2021). Se calculó mediante las ecuaciones 9 y 10.

**Ecuación 9***Productividad másica del agua (kg/m³)*

$$Productividad\ Masica\ Agua = \frac{Y_i}{W_{Total,i}}$$

**Ecuación 10***Productividad másica de la energía (kg/MJ)*

$$Productividad\ Masica\ Energía = \frac{Y_i}{E_{entrada,i}}$$

donde  $Y_i$  es el rendimiento total del cultivo  $i$  en kilogramos (kg),  $W_{Total,i}$  es el volumen total de agua consumida por dicho cultivo en metros cúbicos (m³) y  $E_{entrada,i}$  es la energía total de entrada empleada en su producción, expresada en megajulios (MJ).

*Productividad Económica:* La productividad económica evalúa la rentabilidad financiera del sistema por cada unidad de recurso invertida. Dado que mediante el instrumento de recolección de datos se determina directamente la ganancia final del agricultor, el indicador se calcula dividiendo este beneficio neto ( $B_{neto,i}$ ) entre el recurso respectivo mediante las Ecuaciones 11 y 12 (Karamian et al., 2021):

**Ecuación 11***Productividad económica del agua (\$COP/m³)*

$$Productividad\ Económica\ Agua = \frac{B_{neto,i}}{W_{Total,i}}$$

**Ecuación 12***Productividad económica de la energía (\$COP /MJ)*

$$Productividad\ Económica\ Energía = \frac{B_{neto,i}}{E_{entrada,i}}$$

donde  $B_{neto,i}$  es el beneficio neto obtenido por la comercialización del cultivo  $i$ , expresado en la unidad monetaria local de pesos colombianos (\$COP).

*Normalización y Cálculo del Índice WEF:* Dado que los indicadores evaluados presentan diferentes unidades y escalas de magnitud, fue necesario unificarlos en una escala adimensional entre 0 y 1, que permitiera su integración. Para ello, se aplicó el método de normalización mínimo-máximo propuesto por Juwana et al., (2012), adoptado en el marco del nexo por (Karamian et al., 2021).

Para establecer los límites de normalización en la evaluación de la UAF, los valores de referencia se determinaron utilizando como línea base los extremos productivos reportados en la literatura. Para los indicadores hídricos, se emplearon los reportes locales del ecosistema del Páramo de Berlín (Nieves Barrera & Torres Peña, 2020). Por su parte, para los indicadores energéticos, se recurrió a los balances termodinámicos estandarizados en la literatura internacional para los cultivos evaluados (Abdelkader et al., 2022; Mohammadi et al., 2008).

Una vez definidos los límites, para los indicadores de beneficio, como las productividades másicas y económicas donde un mayor valor representa una mejor condición, se empleó la Ecuación 13.

### **Ecuación 13**

*Ecuación de normalización para valores mayores como mejor condición*

$$X_i = \frac{x_i - \text{Min}(x_i)}{\text{Max}(x_i) - \text{Min}(x_i)}$$

Por el contrario, para los indicadores de costo, como el consumo total de agua y el consumo total de energía (donde un menor valor representa una mejor condición de sustentabilidad), se empleó la Ecuación 14 (Juwana et al., 2012).

**Ecuación 14**

*Ecuación de normalización para valores menores como mejor condición*

$$X_i = \frac{Max(x_i) - x_i}{Max(x_i) - Min(x_i)}$$

Finalmente, el Índice del Nexo Agua-Energía-Alimentos (WEFNI por sus siglas en inglés) para el sistema productivo se determinó mediante la suma ponderada de los indicadores normalizados en la Ecuación 15 (Karamian et al., 2021).

**Ecuación 15**

*Índice del Nexo Agua-Energía-Alimentos*

$$WEFNI = \frac{\sum_{i=1}^n w_i X_i}{\sum_{i=1}^n w_i}$$

Donde  $w_i$  corresponde al peso o nivel de importancia asignado a cada indicador  $X_i$ , y  $n$  es el número total de indicadores evaluados en el modelo. El resultado final del índice  $WEFNI$  es un valor comprendido entre 0 y 1, donde los valores más cercanos a 1 representan un mayor grado de eficiencia y sostenibilidad operativa en el Páramo de Berlín.

Para la aplicación del  $WEFNI$  en la UAF, la asignación de los pesos ( $w_i$ ) para cada uno de los seis indicadores evaluados se fundamentó en la ponderación estandarizada por el panel de expertos de (Karamian et al., 2021). Esta aproximación metodológica permite eliminar la subjetividad en la evaluación del sistema productivo, adoptando un marco de referencia validado en la literatura del nexo a nivel de finca.

De este modo, los coeficientes de ponderación se establecen sobre una escala de importancia cuya sumatoria es equivalente a 50. Los pesos específicos asignados a cada variable corresponden a: 9.1 para la productividad másica del agua; 9.0 para el consumo total de agua; 8.5 para el consumo total de energía; 8.5 para la productividad másica de la energía; 7.9 para la

productividad económica del agua; y 7.0 para la productividad económica de la energía (Karamian et al., 2021). De esta manera, la inclusión de estos pesos fijos asegura que el índice final refleje con precisión la importancia real y la relación directa que existe entre cada recurso dentro del sistema productivo.

La adopción de los coeficientes de ponderación fijos propuestos por Karamian et al., (2021) obedece a tres criterios metodológicos. En primer lugar, garantiza la estandarización y comparabilidad del Índice WEFNI obtenido con otras evaluaciones a nivel global, eliminando la subjetividad del investigador en la asignación de la importancia de los recursos. En segundo lugar, los resultados del panel de expertos internacional otorgan la mayor prioridad (pesos de 9.1 y 9.0) a la productividad y consumo del agua, esta jerarquización coincide de manera óptima con la realidad ecológica del Páramo de Berlín, un ecosistema de alta montaña cuya principal restricción y servicio ambiental es la regulación hídrica. De este modo, el marco de referencia extranjero resulta idóneo para evaluar la sustentabilidad local sin necesidad de alterar matemáticamente el modelo original.

**1.2.1.2 El Nexo WEF a escala doméstica.** Para el análisis del Nexo WEF a nivel del hogar en la UAF, se plantea la adaptación del modelo propuesto por Hussien et al., (2017). Esta metodología emplea un enfoque que permite evaluar las interacciones de recursos a escala doméstica, el nexo se simplifica en siete indicadores críticos que interconectan las demandas hídricas, energéticas y alimentarias del núcleo familiar. Los datos de entrada para alimentar las ecuaciones del modelo se recopilieron mediante una entrevista estructurada aplicada directamente a los habitantes de la UAF.

**1.2.1.2.1 Módulo del Recurso Hídrico Doméstico.** El consumo de agua al interior del hogar se evalúa a través de dos dimensiones la higiene básica y el agua integrada a la preparación de alimentos (Hussien et al., 2017).

*Higiene y Lavado Básico:* Comprende las actividades esenciales de aseo personal (ducha) y mantenimiento textil (lavado de ropa). Dependiendo de la tecnología de uso en la vivienda, se emplean dos métodos de estimación matemática propuestos por Hussien et al., (2017).

Para flujos continuos (ducha) el consumo se calcula en función del tiempo de uso y el caudal (Ecuación 16).

#### **Ecuación 16**

*Consumo diario hídrico per cápita*

$$We_i = Fe_i * De_i * Re_i$$

Para eventos de volumen fijo (Lavado de ropa en lavadora) se calcula multiplicando los ciclos por la capacidad del equipo (Ecuación 17).

#### **Ecuación 17**

*Consumo diario hídrico per cápita volumen fijo*

$$We_i = Fe_i * Ve_i$$

donde:

- $We_i$  : 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.

*Agua para la Preparación de Alimentos:* Este indicador actúa como una interconexión directa entre el recurso hídrico y el alimentario. Cuantifica el volumen de agua empleado por persona al día en el lavado de ingredientes y la cocción térmica de la dieta familiar. Al evaluar el volumen de forma agregada para todas las comidas, el modelo de Hussien et al., (2017) se simplifica mediante la siguiente expresión (Ecuación 18).

### **Ecuación 18**

*Consumo diario promedio per cápita de agua para alimentos*

$$W_{ca} = N_c * W_c$$

donde:

- $W_{ca}$  es el consumo diario promedio per cápita de agua para la preparación general de alimentos, expresado en litros por persona al día (l/p/d).
- $N_c$  es el número de veces al día que se preparan alimentos en el hogar (sesiones/día).
- $W_c$  es el volumen promedio per cápita de agua empleado en cada sesión de cocina (l/p/sesión).

*Generación y Disposición de Aguas Residuales:* Dado que en la UAF de estudio no existen prácticas de recirculación o reúso hídrico, la totalidad del agua consumida al interior de la vivienda se transforma en aguas residuales. Estos vertimientos son descargados de forma combinada hacia un sistema individual de saneamiento básico compuesto por un tanque séptico acoplado a un pozo de absorción. Bajo esta configuración, el tanque séptico ejecuta el tratamiento primario mediante

la remoción de sólidos y digestión anaerobia, mientras que el pozo de absorción garantiza la disposición final del efluente líquido mediante infiltración en el subsuelo del Páramo. Para este módulo, se hace un uso parcial del modelo propuesto por Hussien et al., (2017) para la estimación de las aguas residuales con mayor relevancia volumétrica en el hogar. Por lo tanto, las salidas hacia el sistema de saneamiento se dividen matemáticamente en aguas grises y negras, simplificando los flujos a aquellos estrictamente representativos y medibles en campo para calcular la carga volumétrica total.

Las aguas grises (GW) provienen de las actividades de higiene personal en la ducha y el lavado de ropa (Ecuación 19).

### **Ecuación 19**

*Volumen total de aguas grises generadas*

$$GW = WW_{sh} + WW_{cw}$$

donde:

- $GW$  son el volumen total de aguas grises generadas (l/p/d).
- $WW_{sh}$  es el agua residual proveniente del uso de la ducha (l/p/d).
- $WW_{cw}$  es el agua residual proveniente del lavado de ropa (l/p/d).

Las aguas negras (BW) agrupan los vertimientos con mayor carga orgánica, delimitándose exclusivamente a los inodoros y a las actividades integradas de la cocina (Ecuación 20).

### **Ecuación 20**

*Volumen total de aguas negras generadas*

$$BW = WW_c + WW_{tf}$$

donde:

- $BW$  es el volumen total de aguas negras generadas (l/p/d).

- $WW_c$  es el 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).
- $WW_{tf}$  es el agua residual de las descargas del inodoro tradicional estimado a partir de parámetros estándar de diseño (l/p/d).

**1.2.1.2.2 Módulo del Recurso Energético Doméstico.** El consumo de energía residencial se restringe a los indicadores con mayor sensibilidad y presencia en la ruralidad fría del Páramo de Berlín, la cocción de alimentos y el funcionamiento del equipamiento eléctrico. Dado que el abastecimiento hídrico de la UAF evaluada funciona íntegramente por gravedad, el consumo por bombeo es nulo. Asimismo, al comprobarse que la climatización del agua para el aseo personal se realiza mediante resistencia eléctrica directa, se prescinde de las ecuaciones termodinámicas de calentamiento térmico, unificando este requerimiento dentro del balance de electrodomésticos.

*Combustible para la Cocción de Alimentos:* Representa la "energía integrada a los alimentos" dentro del nexo hogar. Al identificarse un uso mixto y equitativo de fuentes energéticas para la cocción diaria (50% gas propano y 50% biomasa o leña), el modelo de Hussien et al., (2017) se adapta para agrupar la demanda. El consumo se calcula aplicando la proporción de uso a las horas totales de funcionamiento de la estufa (Ecuación 21).

### Ecuación 21

*Consumo diario promedio del combustible*

$$E_c = P_c \times H_c \times E_h$$

donde:

- $E_c$  es el consumo diario promedio del combustible específico  $c$  (gas o leña) para la cocción general de alimentos en el hogar.

- $P_c$  es la proporción de uso del combustible en la vivienda (establecido en 0.5 para ambas fuentes).
- $H_c$  son las horas totales diarias dedicadas a la cocción en la estufa (horas/día).
- $E_h$  es el consumo nominal de combustible por hora de uso del quemador a gas o del fogón de leña.

La estimación de la tasa de consumo nominal ( $E_h$ ). Debido a la ausencia de instrumentación de medida directa en la UAF, el consumo nominal por hora de los sistemas de cocción ( $E_h$ ) se determina mediante estimaciones indirectas y parámetros de literatura. Para el caso del gas licuado de petróleo (GLP), el parámetro se calcula de forma empírica relacionando la masa total del cilindro comercial con su vida útil reportada por los usuarios y las horas diarias efectivas de funcionamiento de la estufa, estableciendo así un caudal de consumo másico (kg/hora). Por otro lado, dada la dificultad técnica para cuantificar la masa exacta de biomasa recolectada empíricamente, el parámetro  $E_h$  para el fogón de leña se adopta a partir de valores estándar de referencia establecidos para el entorno rural colombiano (como los lineamientos de la Unidad de Planeación Minero Energética - UPME), asignando un consumo horario estandarizado acorde a las características tecnológicas del fogón tradicional.

*Energía para Electrodomésticos y Calentamiento de Agua:* Este indicador cuantifica el gasto energético derivado del inventario de equipos eléctricos activos en la vivienda. Para esta UAF, el análisis se delimita estrictamente a los sistemas de refrigeración (nevera), mantenimiento textil (lavadora) y calentamiento de agua (ducha eléctrica), dada la ausencia de otros equipos de entretenimiento (como televisores) o sistemas de bombeo puesto que el hogar usa un sistema por gravedad. Al realizarse la climatización del agua para el aseo personal mediante una resistencia

eléctrica directa, se prescinde de las ecuaciones termodinámicas de calentamiento térmico, unificando este requerimiento dentro del balance general de electrodomésticos.

Para su cálculo, se asume una potencia nominal estable durante los periodos de activación diaria de cada equipo, utilizando la ecuación propuesta por Hussien et al., (2017) adaptada (Ecuación 22).

### **Ecuación 22**

*Consumo energético diario per cápita de electrodomésticos*

$$E_{ai} = N_{ai} \times D_{ai} \times W_{ai}$$

donde:

- $E_{ai}$  es el consumo energético diario per cápita del equipo  $i$  (nevera, lavadora o ducha eléctrica), expresado en kilovatios-hora por persona al día (kWh/p/d).
- $N_{ai}$  es la cantidad de un mismo equipo en la vivienda (unidades).
- $D_{ai}$  es la duración promedio diaria de la operación del equipo por persona (horas/p/d).
- $W_{ai}$  es la potencia eléctrica nominal del equipo respectivo, expresado en vatios (Watt).

La duración de operación ( $D_{ai}$ ) para equipos de uso esporádico o fraccionado, como la lavadora, se determinará distribuyendo el tiempo de los ciclos semanales entre los siete días de la semana y el número de habitantes. Para la potencia nominal ( $W_{ai}$ ), a falta de medición directa con vatímetro, se emplearán los valores de placa de los equipos con referencias estándar de la literatura técnica.

**2.1.1.2.3 Módulo de Alimentación y Residuos Orgánicos Domésticos.** Este módulo restringe su análisis a los productos de alta relevancia y consumo local en el páramo, así como al subproducto final del nexo hídrico-alimentario.

*Consumo de Alimentos Básicos Locales:* Se evalúa la ingesta per cápita enfocándose estrictamente en cereales (arroz, harinas), raíces/tubérculos (papa y cebolla) y proteína (carne y huevos), elementos esenciales de la dieta y la base agrícola del entorno de estudio. Dado que la recolección de datos agrupa el volumen diario de preparación alimentaria, el modelo propuesto por Hussien et al., (2017) se adapta para cuantificar el consumo total agregado, omitiendo la segregación por alimento específico (Ecuación 23).

### **Ecuación 23**

*Cantidad diaria neta consumida per cápita de alimentos*

$$F = \frac{F_{dia} \times 500}{N_{hab}}$$

donde:

- $F$  es la cantidad diaria neta consumida per cápita de alimentos básicos, medida en gramos por persona al día (g/p/d).
- $F_{dia}$  es la cantidad total de alimentos promedio preparados diariamente en el hogar, expresada en libras (libras/día).
- 500 es el factor de conversión estandarizado empírico de libras a gramos.
- $N_{hab}$  es el número total de habitantes permanentes de la vivienda.

*Generación de Residuos de Alimentos Orgánicos:* Mide el desperdicio generado en el hogar posterior al procesamiento e ingesta de la comida, es el indicador de salida para la evaluación de estrategias futuras de economía circular y cierre de ciclos (como compostaje o abono orgánico para la misma UAF). Se calcula utilizando un porcentaje de desperdicio estimado por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura FAO (Gustavsson et al., 2011) e integrado en el modelo de Hussien et al., (2017) (Ecuación 24).

**Ecuación 24**

*Masa total de residuos orgánicos generados por persona al día*

$$FW = PFW * F$$

donde:

- *FW* es la masa total de residuos orgánicos generados por persona al día (g/p/d).
- *PFW* es el porcentaje estandarizado promedio de desperdicio en la etapa de consumo final, adaptado según las bases de datos de referencia regional de la FAO (%).
- *F* es la cantidad diaria neta de alimento consumido per cápita (g/p/d).

Debido a que la cuantificación de la ingesta alimentaria en la UAF se registró de manera agregada sin segregar por rubro específico, se adopta un factor estandarizado de desperdicio (PFW) del 6%. Este valor corresponde al promedio aritmético de los porcentajes de desperdicio en la etapa de consumo final para los grupos alimentarios de América Latina, reportados en el estudio global de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (Gustavsson et al., 2011; Hussien et al., 2017).

### 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*, 12(7). <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. <https://noesis.uis.edu.co/handle/20.500.14071/35889>
- C-369/19 Corte Constitucional de Colombia. (n.d.). Retrieved November 11, 2025, from <https://www.corteconstitucional.gov.co/relatoria/2019/c-369-19.htm>
- Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDMB). (2024). Plan de manejo ambiental del Distrito de Manejo Integrado del Páramo de Berlín. CDMB. [https://www.cdm.gov.co/images/documentos/institucional/areas\\_protegidas/Doc%20DMI%20P%20Berl%C3%ADn.pdf](https://www.cdm.gov.co/images/documentos/institucional/areas_protegidas/Doc%20DMI%20P%20Berl%C3%ADn.pdf)
- David, W., Martínez, S., Ochoa, M. F., & Duarte, C. (2023). Proceso de cálculo de la unidad agrícola familiar (UAF) mediante la metodología por unidades físicas homogéneas (UFH) a escala municipal: estudio de caso Aracataca, Magdalena, Colombia. *Naturaleza y Sociedad. Desafíos Medioambientales*, (7), 30–65. <https://doi.org/10.53010/nys7.01>
- 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>
- Endo, A., Burnett, K., Orencio, P. M., Kumazawa, T., Wada, C. A., Ishii, A., Tsurita, I., & Taniguchi, M. (2015). Methods of the Water-Energy-Food Nexus. *Water* 2015, Vol. 7, Pages 5806–5830, 7(10), 5806–5830. <https://doi.org/10.3390/W7105806>
- 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>
- Gustavsson, J., Cederberg, C., Sonnesson, U., Otterdijk, R. V., & Meybeck, A. (2011). Global Food loss and food waste: Extent, Causes and solutions. *Food Loss and Food Waste: Causes and Solutions*, 1–204. [https://knowledge4policy.ec.europa.eu/publication/global-food-losses-food-waste-extent-causes-prevention\\_en](https://knowledge4policy.ec.europa.eu/publication/global-food-losses-food-waste-extent-causes-prevention_en)
- Hoff, H. (2011). *Understanding the Nexus*. <https://www.sei.org/publications/understanding-the-nexus/>
- 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>

- Juliana Barrera Cadena Emily Bautista Prada, M., & Edgar Ricardo Oviedo Ocaña, C. (2022). *Influencia de las actividades agropecuarias sobre el contenido de nitrógeno en el agua superficial de una unidad hidrográfica en el Páramo de Berlín (Santander, Colombia)*. Universidad Industrial de Santander. <https://noesis.uis.edu.co/handle/20.500.14071/9965>
- Juwana, I., Muttill, N., & Perera, B. J. C. (2012). Indicator-based water sustainability assessment — A review. *Science of The Total Environment*, 438, 357–371. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2012.08.093>
- 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>
- Karnib, A., & Karnib, A. (2017). Water-Energy-Food Nexus: A Coupled Simulation and Optimization Framework. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 5(4), 84–98. <https://doi.org/10.4236/GEP.2017.54008>
- Ley 99 de 1993 - Gestor Normativo - Función Pública. (n.d.). Retrieved November 11, 2025, from [https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=297&utm\\_source=chatgpt.com](https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=297&utm_source=chatgpt.com)
- Ley 160 de 1994 - Gestor Normativo - Función Pública. (n.d.). Retrieved March 2, 2025, from <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=66789>
- Ley 1930 de 2018 - Gestor Normativo - Función Pública. (n.d.). Retrieved November 11, 2025, from <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=87764>
- Lowder, S. K., Sánchez, M. V., & Bertini, R. (2021). Which farms feed the world and has farmland become more concentrated? *World Development*, 142, 105455. <https://doi.org/10.1016/J.WORLDDEV.2021.105455>

- Mohammadi, A., Tabatabaeefar, A., Shahin, S., Rafiee, S., & Keyhani, A. (2008). Energy use and economical analysis of potato production in Iran a case study: Ardabil province. *Energy Conversion and Management*, 49(12), 3566–3570. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2008.07.003>
- Naranjo, L., Correa-Cano, M. E., Rey, D., Chengot, R., España, F., Sactic, M., Knox, J. W., Yan, X., Viteri-Salazar, O., Foster, W., & Melo, O. (2023). A scenario-specific nexus modelling toolkit to identify trade-offs in the promotion of sustainable irrigated agriculture in Ecuador, a Belt and Road country. *Journal of Cleaner Production*, 413, 137350. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2023.137350>
- 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)*. Universidad Industrial de Santander. <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. <https://noesis.uis.edu.co/handle/20.500.14071/38113>
- Ozkan, B., Kurklu, A., & Akcaoz, H. (2004). An input-output energy analysis in greenhouse vegetable production: a case study for Antalya region of Turkey. *Biomass and Bioenergy*, 26, 89–95. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(03\)00080-1](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(03)00080-1)
- 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 Gutiérrez, E., Andelfo Lizcano Caro, J., & Asprilla Lara, Y. (2014). Las unidades agrícolas familiares (UAF), un instrumento de política rural en Colombia. *Tecnogestión: Una Mirada al Ambiente*, 11(1), 33–39. <https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/tecges/article/view/8290/10712>
- 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>