



HETEROGENEIDAD DE AGROECOSISTEMAS Y SEGURIDAD HÍDRICA EN LA PROVINCIA DEL SUMAPAZ. COLOMBIA DESDE UNA SALUD

Lourdes Elvira Rodríguez Guzmán¹
ORCID: 0000-0002-9081-4627

Hakna Ferro Azcona²
ORCID: 0000-0002-8934-1404

¹ Doctoranda en Proyectos, Universidad Americana de Europa (UNADE). Correo: lourdeselvirar@gmail.com

² Profesora-Investigadora, Universidad Americana de Europa (UNADE). Correo: hakna.ferro@aulagrupo.es

RESUMEN

En el Sumapaz, alto la seguridad hídrica rural depende de la interacción entre la calidad microbiológica del agua, exposición sanitaria, prácticas agropecuarias y capacidad local de respuesta. El estudio analizó la asociación entre heterogeneidad agroecosistémica y condiciones hidrosanitarias desde el enfoque de Una Salud. Se realizó un estudio observacional analítico con 124 unidades de producción agropecuaria (UPA) y seguimiento pareado de 48 puntos de agua durante períodos seco y lluvioso, equivalente a 96 eventos de muestreo. La tipificación mediante análisis de componentes principales y agrupamiento jerárquico de Ward distinguió 29 UPA consolidadas, 45 en transición y 50 de subsistencia. En el período lluvioso aumentaron *Escherichia coli*, enterococos intestinales y turbidez. *Salmonella spp.* se detectó en 19 eventos y *Campylobacter spp.* en 25. La detección de al menos un patógeno se asoció con acceso animal, manejo insuficiente de excretas, baja protección de la fuente, alta densidad animal y período lluvioso. El uso y la disposición de antimicrobianos indicaron presión ambiental potencial, sin demostrar resistencia. Se concluyó que la vigilancia hidrosanitaria debía ajustarse al perfil productivo y combinar inspección sanitaria, indicadores fecales y pruebas selectivas de patógenos.

Palabras clave: Patógenos Entéricos, Resistencia Antimicrobiana, Riesgos Hidrosanitarios.

ABSTRACT

In the upper Sumapaz region, rural water security depends on the interaction among microbiological water quality, productive practices, sanitary exposure, and local response capacity. The study assessed the association between agroecosystem heterogeneity and hydro-sanitary conditions within a One Health framework. An analytical observational study was conducted with 124 agricultural production units (APUs) and paired monitoring of 48 water sites during dry and rainy periods, yielding 96 sampling events. Principal component analysis and Ward hierarchical clustering distinguished 29 consolidated, 45 transitional, and 50 subsistence APU's. Rainy-period samples showed higher *Escherichia coli*, intestinal enterococci, and turbidity. *Salmonella spp.* were detected in 19 sampling events and *Campylobacter spp.* in 25. Detection of at least one pathogen was associated with livestock access to water sources, inadequate manure management, insufficient source protection, high animal density, and the rainy period. Antimicrobial use and disposal practices indicated potential environmental pressure but did not demonstrate antimicrobial resistance. The findings supported hydro-sanitary surveillance tailored to productive profiles and combining sanitary inspection, fecal indicators, and selective pathogen testing.

Keywords: Antimicrobial Resistance, Enteric Pathogens, Hydrosanitary Risks.

INTRODUCCIÓN

Los páramos andinos almacenan y regulan el agua que sostiene actividades locales y abastecimientos situados fuera de la montaña. En el alto Sumapaz, los nacimientos y las quebradas abastecen hogares, sistemas pecuarios y otras actividades agropecuarias. La superposición de usos hace que los cambios en la cobertura vegetal, la compactación del suelo y la incorporación de materia orgánica, puedan modificar la infiltración y movilizar sedimentos, nutrientes y microorganismos hacia las corrientes. El trabajo clásico de Buytaert et al. (2006) continúa siendo un referente para comprender la sensibilidad hidrológica de estos ecosistemas, mientras que Rey-Romero et al. (2022) aportan evidencia reciente sobre el efecto de la agricultura en aguas superficiales de páramo.

La seguridad hídrica no se limita a estimar la disponibilidad o el caudal: comprende acceso, continuidad, calidad, exposición de la población y conservación de las funciones ecosistémicas que sostienen el abastecimiento (Gomez-Jaramillo et al., 2024; Octavianti & Staddon, 2021). En cuencas con actividad pecuaria, una misma fuente puede ser utilizada por personas y animales, y la escorrentía conecta potreros, instalaciones, captaciones y puntos de consumo. El enfoque de Una Salud permite examinar estas relaciones como parte de un sistema común, porque la salud humana, animal y ambiental depende de procesos compartidos (World Health Organization, 2022).

La provincia del Sumapaz reúne unidades productivas agropecuarias (UPA) con tamaños, cargas animales, orientaciones comerciales e infraestructuras contrastantes. Los estudios regionales describen esa diversidad y documentan problemas bacteriológicos en aguas utilizadas en predios ganaderos (Albarracín-Zaidiza et al., 2019; Arenas Suarez et al., 2017; Fonseca-Carreño, 2021). Sin embargo, aún no está claro como estas diferencias modifican las vías de exposición, la presión sobre las fuentes y la capacidad de respuesta ante un deterioro de la calidad de agua. Tampoco se examina de forma integrada cómo las prácticas veterinarias y la disposición de medicamentos pueden favorecer presión antimicrobiana ambiental, sin que ello equivalga por sí mismo a resistencia demostrada (Berendonk et al., 2015; Larsson & Flach, 2022). Esta brecha justifica comparar perfiles productivos y condiciones hidrosanitarias dentro de un mismo territorio.

La investigación parte de la pregunta: ¿cómo se asocian los perfiles agroecosistémicos y sus prácticas de manejo con la calidad microbiológica, la detección de patógenos entéricos y la capacidad de respuesta hídrica en las cuencas altas del río Sumapaz? El objetivo general es analizar la asociación entre heterogeneidad agroecosistémica y las condiciones hidrosanitarias del agua desde el enfoque de Una Salud. Los objetivos específicos son identificar los perfiles productivos y las prácticas de manejo presentes en las cuencas estudiadas y establecer cómo estas características se relacionan con la calidad microbiológica del agua, considerando los períodos hidrológicos, las condiciones de exposición y las prácticas asociadas al uso de antimicrobianos.

ESTADO DEL ARTE

La evidencia en ambientes altoandinos y cuenca agrícolas no muestra un efecto uniforme de la producción sobre el agua; influyen intensidad de uso, pendiente, vegetación ribereña y conexión hidrológica. En Sumapaz se describen sistemas productivos contrastantes y presencia de *Escherichia coli* en aguas de predios ganaderos (Albarracín-Zaidiza et al., 2019; Arenas-Suarez et al., 2017; Fonseca-Carreño, 2021), pero estos estudios no integran tipologías de finca, seguimiento estacional, patógenos entéricos y prácticas veterinarias.

Las tipologías permiten ordenar la diversidad productiva sin reducirla al tamaño o al ingreso (Alvarez et al., 2018; Huber et al., 2024). En el componente hídrico, Rey-Romero et al. (2022) relacionan la agricultura de páramo con nutrientes *Escherichia coli*, Chevez et al. (2024) muestran que los patógenos

responden de manera variable a factores ambientales y Hokajärvi et al. (2024) destacan el valor del rastreo de fuentes fecales. De otra parte, Wilkes et al. (2009) toma en consideración la variación estacional de indicadores y patógenos en paisajes agrícolas. Por ello, un patrón estacional o indicador no debe trasladarse entre cuencas sin validación.

En Colombia, la resistencia antimicrobiana se ha documentado en matrices diferentes de las aguas aquí estudiadas (Paredes et al., 2023; Posada-Perlaza et al., 2019), por lo que esos hallazgos sustentan vigilancia, pero no pueden extrapolarse directamente a las UPA del alto Sumapaz. La evidencia reciente muestra circulación agroambiental de bacterias resistentes y determinantes genéticos entre suelo y agua (Lopes et al., 2024; Martak et al., 2024), mientras el Instituto Colombiano Agropecuario (ICA) mantiene actividades de vigilancia en producción primaria (Instituto Colombiano Agropecuario [ICA], 2026). Ninguna de esas fuentes aporta resultados fenotípicos o moleculares para las UPA y aguas de alto Sumapaz; ese vacío sustenta el presente análisis.

MARCO TEÓRICO

En este artículo, la heterogeneidad agroecosistémica se entiende como el conjunto de diferencias entre las UPA en orientación productiva, carga animal, recursos físicos, infraestructura hidrosanitaria, dependencia de fuentes locales y manejo de excretas. Estas diferencias se organizan en tres ejes: la presión ejercida sobre el agua por demanda y residuos; vías de exposición y ausencia o falla de barreras; y recursos y arreglos disponibles para corregir problemas. Los perfiles expresan combinaciones de fortalezas y vulnerabilidades, no niveles sucesivos de sostenibilidad (Alvarez et al., 2018; Huber et al., 2024).

La seguridad hídrica hidrosanitaria integra disponibilidad de agua suficiente y apta, reducción de la exposición y conservación de los procesos ecológicos que sostienen el abastecimiento. Desde Una Salud, el agua funciona como recurso y como vía de transporte de microorganismos y residuos entre áreas productivas, animales y usuarios. *Escherichia coli* y los enterococos intestinales se emplean como indicadores de contaminación fecal, mientras *Salmonella spp.* y *Campylobacter spp.* representan peligros específicos cuya presencia depende de reservorios, supervivencia ambiental y métodos de recuperación diferentes (Korajkic et al., 2018).

La presión antimicrobiana potencial se reconoce a partir del uso de medicamentos, su excreción, la eliminación de sobrantes y envases y el transporte de residuos por escorrentía. Estas condiciones pueden favorecer procesos de selección o dispersión, pero no constituyen una medición de resistencia. La demostración de resistencia requiere aislamientos trazables, pruebas de susceptibilidad con criterios normalizados y, según la pregunta de investigación, medición de residuos o determinantes genéticos (Berendonk et al., 2015; Larsson & Flach, 2022).

METODOLOGÍA

Diseño y área de estudio

Se realizó un estudio observacional analítico con dos componentes complementarios: una caracterización transversal de Unidades de Producción Agropecuaria (UPA) y un seguimiento repetido de puntos de agua durante los periodos seco y lluvioso. El trabajo de campo se desarrolló durante 2024 y 2025 en cinco municipios del alto Sumapaz, Cundinamarca, Colombia. El reporte del componente observacional se organizó con apoyo de STROBE (von Elm et al., 2007).

Población, muestra y unidades de análisis

La muestra estuvo conformada por 124 UPA, incluidas mediante muestreo no probabilístico por disponibilidad y participación voluntaria. Todas se incorporaron al análisis de la heterogeneidad

[Revista de Investigación Multidisciplinaria Iberoamericana, RIMI](#) © 2023 by Elizabeth Sánchez Vázquez is licensed under

productiva. La unidad de análisis productiva fue la UPA: para el componente ambiental, la unidad de observación fue el punto de agua y cada evento punto-fecha constituyó una medición repetida. Una matriz de vinculación relacionó UPA, fuente y punto de muestreo mediante un código que integró tipo y uso de la fuente, coordenadas geográficas y fecha.

Se aplicó una encuesta estructurada sobre orientación productiva, inventario animal, infraestructura, fuentes y usos del agua, saneamiento, manejo de excretas, protección de nacimientos, tratamientos veterinarios y percepción del riesgo. En campo se observaron riberas, captaciones, tanques e instalaciones pecuarias y la información declarada se contrastó con las condiciones registradas. La encuesta fue revisada mediante juicio de expertos y ajustada después de una prueba piloto en 30 UPA no incluidas en la muestra analítica (Fetters et al., 2013).

Selección de los puntos de agua

Después de definir los perfiles sobre las 124 UPA, se estableció una submuestra ambiental de 48 puntos de agua con asignación proporcional por perfil. La asignación se calculó como $n_h = 48 \times (N_h/124)$ y se ajustó mediante el método de los mayores restos. Con 29 UPA consolidadas, 45 en transición y 50 de subsistencia, la distribución resultó en 11, 18 y 19 puntos, respectivamente. Los 48 puntos estuvieron vinculados a UPA de la muestra y se siguieron en ambos períodos hidrológicos, por lo que generaron 96 eventos de muestreo. Esta submuestra ambiental quedó anidada en la muestra productiva y no se utilizó para redefinir los perfiles.

Muestreo y análisis del agua

El muestreo se organizó de forma estratificada por perfil agroecosistémico. En cada visita se registraron el tipo y uso de la fuente, la turbidez, la conductividad, el acceso animal, la protección de la captación, la presencia de excretas, la precipitación antecedente y las condiciones del entorno. Las muestras se identificaron con un código único y se transportaron en recipientes estériles, refrigeradas entre 2 y 8 °C y se mantuvieron bajo cadena de custodia. Para los indicadores bacteriológicos se consideró un volumen mínimo de 300mL y el procesamiento se realizó dentro de las ocho horas posteriores a la recolección. Cuando se detectó cloro residual, se utilizó tiosulfato de sodio en la concentración validada por el laboratorio. Cuando se detectó cloro residual, se utilizó tiosulfato de sodio en la concentración validada por el laboratorio.

Los coliformes totales y *Escherichia coli* se cuantificaron por filtración de membrana de 0,45 µm y se reportaron en UFC/100 mL; los enterococos se analizaron como indicador complementario. *Salmonella spp.* se detectó según ISO 19250:2010. Para *Campylobacter spp.* termotolerantes se aplicó ISO 17995:2019; la adaptación a la turbidez siguió las alternativas contempladas por la norma: filtración de membrana en muestras de baja turbidez y, cuando la turbidez impidió filtrar el volumen prevista, inoculación directa del material en medio de enriquecimiento. Los resultados de ambos patógenos se informaron como presencia/ausencia. Cada lote incluyó controles positivos y negativos, blanco de proceso y verificaciones del plan de calidad (International Organization for Standardization [ISO], 2010, 2019).

Construcción de perfiles y análisis estadístico

Las variables de la encuesta se depuraron, codificaron y estandarizaron antes del análisis multivariado. El análisis de componentes principales (ACP) integró orientación productiva, carga animal, infraestructura, dependencia de fuentes locales, saneamiento, manejo de excretas, protección de la fuente, uso veterinario reciente y percepción del riesgo. La retención de componentes se definió considerando el gráfico de sedimentación, la varianza acumulada y la interpretabilidad. Las cargas principales se interpretaron por su contribución relativa al patrón: el primer componente concentró la intensificación productiva, la carga animal, la infraestructura y la vinculación al mercado; el segundo concentró la

protección de fuentes, el manejo de excretas, el saneamiento, la dependencia de fuentes locales y la capacidad de respuesta (Jolliffe & Cadima, 2016).

Sobre las puntuaciones de los componentes retenidos se aplicó agrupamiento jerárquico aglomerativo con distancia euclidiana y método de Ward. El punto de corte se fijó inmediatamente antes del incremento más marcado de la distancia de enlace observado en el dendrograma. La solución de tres conglomerados se conservó por su coherencia con la distribución de las UPA en el plano factorial y con la información de campo; este criterio de decisión se visualiza en la Figura 1 (Rousseeuw, 1987; Ward Jr., 1963).

Las variables continuas se resumieron mediante mediana y rango intercuartílico y las categóricas, a través de frecuencias y porcentajes. Se aplicó la prueba de rangos con signo de Wilcoxon para mediciones continuas pareadas, McNemar para detecciones pareadas y rho de Spearman para precipitación y *Escherichia coli*. El desenlace del modelo logístico mixto fue la detección de al menos uno de los dos patógenos entéricos. Los predictores se definieron a priori por plausibilidad hidrosanitaria: acceso animal a la fuente (sí/no), manejo insuficiente de excretas (sí/no), período hidrológico (lluvioso/seco), baja protección de la fuente (sí/no) y alta densidad animal, definida como UGG/ha por encima de la mediana. El modelo incluyó intercepto aleatorio por punto de agua y ajuste por perfil agroecosistémico y tipo de fuente. La colinealidad se examinó mediante el factor de inflación de la varianza, con umbral de 5. Se informaron razones de momios o de probabilidades (OR), intervalos de confianza del 95% y valores de $p < 0,05$, con un nivel de significancia de 0,05.

Consideraciones éticas

La participación de las UPA fue voluntaria y los registros se codificaron para proteger la identidad de los participantes. Se obtuvo consentimiento informado y se gestionaron los permisos de ingreso a los predios y de muestreo de las fuentes de agua.

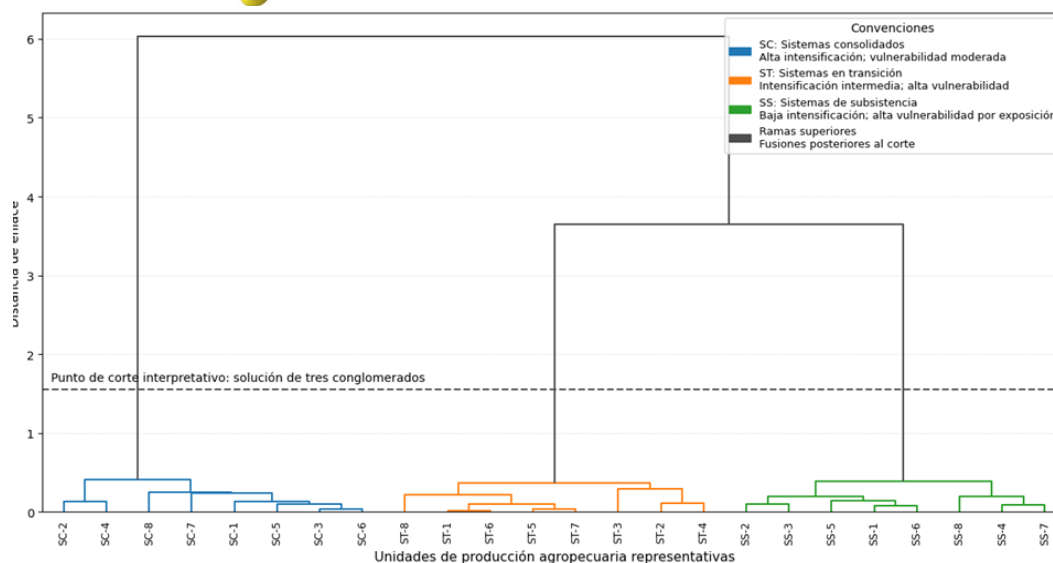
RESULTADOS

Perfiles agroecosistémicos

La clasificación de la muestra analizada (124 UPA) distinguió tres perfiles agroecosistémicos: 29 UPA consolidadas (23,4%), 45 en transición (36,3%) y 50 de subsistencia (40,3%). El primer componente del ACP ordenó principalmente la intensificación productiva y la vinculación al mercado, mientras el segundo diferenció condiciones de vulnerabilidad hidrosanitaria. Como se observa en la Figura 1, el corte se ubica antes del incremento más marcado de la distancia de enlace y conservar tres conglomerados interpretables.

Figura 1

Dendrograma representativo del agrupamiento jerárquico de Ward para la identificación de perfiles agroecosistémicos



Nota. SC = sistemas consolidados; ST = sistemas en transición; SS = sistemas de subsistencia. La línea punteada indica el punto de corte interpretativo antes del incremento más marcado de la distancia de enlace. Se muestran unidades representativas para facilitar la lectura del patrón de fusión. Elaboración propia.

Las principales diferencias entre los perfiles se resumen en la Tabla 1. Los consolidados presentan mayor intensificación e infraestructura relativa; los sistemas en transición combinan crecimiento productivo y saneamiento parcial; y los de subsistencia muestran menor carga animal y mayor dependencia de fuentes locales.

Tabla 1
Características de los perfiles agroecosistémicos

Dimensión	Consolidados (n=29)	En transición (n=45)	Subsistencia (n=50)
Orientación productiva	Especializada y vinculada al mercado	Doble propósito y crecimiento gradual	Autoconsumo y venta de excedentes
Carga animal aproximada	3,5 UGG/Ha	1,8 UGG/ha	0,8 UGG/ha
Infraestructura	Relativamente alta	Parcial frente al crecimiento	Básica o limitada
Relación con el agua	Demanda y residuos elevados	Demanda creciente y saneamiento rezagado	Dependencia directa de fuentes locales
Capacidad de respuesta	Alta relativa	Intermedia	Baja material; mayor importancia comunitaria

Nota. UGG/ha=unidades de gran ganado por hectárea.

Calidad microbiológico y período hidrológico

Como muestra la Tabla 2, en el período lluvioso la mediana de *Escherichia coli* aumenta de 38 a 164 UFC/100 mL, los enterococos intestinales de 24 a 96 UFC/100 mL y la turbidez de 3,6 a 10,8 NTU. Las medianas de conductividad son 78 y 82 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en los períodos seco y lluvioso, respectivamente. La correlación entre precipitación antecedente y *Escherichia coli* es $\rho = 0,57$. Las comparaciones pareadas muestran diferencias para *Escherichia coli*, enterococos y turbidez, pero no para conductividad.

Tabla 2

Indicadores microbiológicos y fisicoquímicos por período hidrológico

Indicador	Seco (n=48)	Lluvioso (n=48)	p
E.coli (UFC/100 mL)	38 (12-96)	164 (64-396)	< 0,001
Enterococos intestinales (UFC/100 mL)	24 (8-61)	96 (34-214)	< 0,001
Turbidez (NTU)	3,6 (2,1 – 6,9)	10,8 (5,7 – 23,4)	< 0,001
Conductividad (μS/cm)	78 (55-112)	82 (59-119)	0,410
Salmonella spp., n(%)	5 (10,4)	14 (29,2)	0,023
Campylobacter spp., n(%)	8 (16,7)	17 (35,4)	0,035

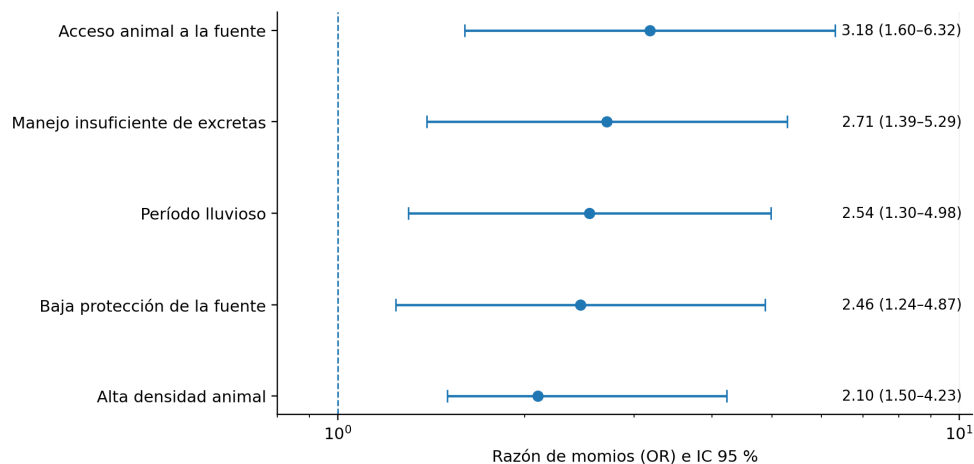
Nota. Los valores continuos se presentan como mediana (Rango Intercuartílico [RIC]). Se aplicó la prueba de rangos con signo de Wilcoxon para las variables continuas y la prueba de Mc Nemar para detecciones pareadas.

Detección de patógenos y condiciones de exposición

Se detecta *Salmonella spp.* en 19 de 96 eventos (19,8 %) y *Campylobacter spp.* en 25 (26,0 %). Cuatro detecciones de *Salmonella spp.* y seis de *Campylobacter spp.* ocurren con concentraciones de *Escherichia coli* inferiores a 100 UFC/100 mL. El modelo ajustado muestra asociaciones con acceso animal a la fuente, manejo insuficiente de excretas, período lluvioso, baja protección de la fuente y alta densidad animal. La Figura 2 presenta las OR y sus intervalos de confianza del 95 %.

Figura 2

Asociación entre condiciones de exposición y detección de al menos un patógeno entérico



Nota. Razón de momios o probabilidades e intervalos de confianza del 95% estimados mediante regresión logística con intercepto aleatorio por punto. La línea vertical corresponde a OR = 1.

Uso y disposición de antimicrobianos

El uso veterinario reciente de antimicrobianos corresponde a 21 de 29 UPA consolidadas (72,4 %), 20 de 45 en transición (44,4 %) y 13 de 50 de subsistencia (26,0 %). Entre las unidades que informan uso reciente, la disposición inadecuada se estima en 6 de 21 consolidadas (28,6 %), 10 de 20 en transición (50,0 %) y 9 de 13 de subsistencia (69,2 %). La Tabla 3 resume las diferencias observadas entre perfiles.

Tabla 3

Uso y disposición de antimicrobianos por perfil agroecosistémico

Indicador	Consolidadas	En transición	Subsistencia
UPA con uso reciente, n/N (%)	21/29 (72,4%)	20/45 (44,4%)	13/50 (26%)
Disposición inadecuada entre usuarias, n/N (%)	6/21 (28,6%)	10/20 (50%)	9/13 (69,2%)
Tipo de disposición predominante	Entrega a gestores autorizados y enterramiento	Enterramiento y almacenamiento indefinido	Enterramiento, quema y disposición con residuos domésticos
Principal necesidad	Trazabilidad y control efluentes	Adecuación preventiva y asistencia técnica	Disposición segura y apoyo institucional

Nota. Estos datos describen prácticas de uso y rutas potenciales de presión ambiental; no constituyen evidencia de resistencia antimicrobiana.

DISCUSIÓN

La clasificación identifica tres configuraciones productivas que no constituyen una escala lineal de seguridad. Una mayor infraestructura puede coexistir con mayor presión productiva, mientras las unidades de menor escala dependen más de captaciones locales. En las UPA de transición, el crecimiento productivo puede adelantarse a las mejoras de saneamiento, patrón consistente con el uso de tipologías para comprender sistemas agrícolas heterogéneos (Alvarez et al., 2018; Huber et al. (2024).

El periodo lluvioso coincide con mayores concentraciones de *Escherichia coli*, enterococos y turbidez, además de más detecciones de *Salmonella spp.* y *Campylobacter spp.* Este patrón es compatible con estudios que documentan variación ambiental y estacional en aguas agrícolas y de páramo (Chevez et al., 2024; Hokajärvi et al., 2024; Rey-Romero et al., 2022; Yenew et al., 2025). No obstante, dos campañas no permiten separar completamente el efecto del periodo hidrológico de la intensidad de las lluvias, el caudal o la movilización de sedimentos.

La detección de *Salmonella spp.* y *Campylobacter spp.* con *Escherichia coli* inferior a 100 UFC/100 mL confirma que un indicador fecal aislado no descarta peligros específicos. La relación entre indicadores y patógenos depende de la matriz, el ambiente y las fuentes de contaminación, por lo que la vigilancia requiere combinar inspección sanitaria, indicadores de rutina y pruebas dirigidas según el uso del agua (Chevez et al., 2024; Korajkic et al., 2018). La mayor frecuencia de *Campylobacter spp.* debe interpretarse con cautela porque depende del método, el volumen procesado, la turbidez y la confirmación analítica; además, la detección en agua no identifica por sí sola el reservorio (Arenas-Suarez et al., 2017; Hokajärvi et al., 2024).

Las asociaciones con acceso animal, manejo de excretas, periodo lluvioso, baja protección y densidad animal son coherentes con mecanismos de exposición hidrosanitaria, pero las OR expresan asociación y no causalidad. Pueden persistir efectos de variables no medidas, como posición en la cuenca, fauna o intensidad de precipitación (Yenew et al., 2025). De manera complementaria, el uso y la disposición de antimicrobianos representan presión ambiental potencial, no resistencia demostrada. Los antecedentes colombianos justifican vigilancia sin extrapolaciones directas al Sumapaz (Paredes et al., 2023; Posada-Perlaza et al., 2019).

Los hallazgos apoyan medidas diferenciadas: manejo de efluentes donde la presión productiva es mayor; saneamiento que acompañe el crecimiento de las UPA en transición; y protección de captaciones o tratamiento en el punto de uso cuando existe alta dependencia de fuentes locales. Las principales

limitaciones son el uso de dos campañas, el diseño observacional, la selección por disponibilidad, la ausencia de marcadores de origen fecal y la falta de pruebas de susceptibilidad o caracterización molecular. Estas condiciones restringen la inferencia causal y la generalización, pero no invalidan la utilidad de los perfiles para orientar vigilancia y prevención (Huber et al., 2024; World Health Organization, 2026).

CONCLUSIONES

Las 124 UPA estudiadas se organizan en tres perfiles: consolidado, transición y subsistencia. Las diferencias en infraestructura, carga animal, relación con las fuentes de agua y capacidad de respuesta permiten reconocer formas distintas de presión y exposición hidrosanitaria, sin interpretarlas como niveles sucesivos de seguridad.

Durante el período lluvioso se observan mayores concentraciones de *Escherichia coli*, enterococos intestinales y turbidez y una mayor detección de *Salmonella spp.* y *Campylobacter spp.* El acceso animal, el manejo insuficiente de excretas, la baja protección de las captaciones, la alta densidad animal y el período lluvioso se asocian con la detección de al menos un patógeno, por lo que la vigilancia debe combinar análisis microbiológicos e inspección de las condiciones de cada fuente.

Las prácticas de uso y disposición de antimicrobianos identifican rutas potenciales de presión ambiental, pero no constituyen evidencia de resistencia antimicrobiana. En consecuencia, la gestión del agua en el alto Sumapaz requiere medidas acordes con las características de las UPA y sus fuentes, articulando condiciones productivas, ambientales y sanitarias desde Una Salud y reservando las afirmaciones sobre resistencia para estudios con pruebas de susceptibilidad o caracterización molecular.

REFERENCIAS

- Albarracín-Zaidiza, J. A., Fonseca-Carreño, N. E., & López-Vargas, L. H. (2019). Las prácticas agroecológicas como contribución a la sustentabilidad de los agroecosistemas. Caso provincia del Sumapaz. *Ciencia y Agricultura*, 16(2), 39–55. <https://doi.org/10.19053/01228420.v16.n2.2019.9139>
- Alvarez, S., Timler, C. J., Michalscheck, M., Paas, W., Descheemaeker, K., Tiftonell, P., Andersson, J. A., & Groot, J. C. J. (2018). Capturing farm diversity with hypothesis-based typologies: An innovative methodological framework for farming system typology development. *PLOS ONE*, 13(5), e0194757. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0194757>
- Arenas Suarez, N. E., Abril, D. A., & Moreno Melo, V. (2017). Evaluación de la calidad del agua para uso agropecuario en predios ganaderos localizados en la región del Sumapaz (Cundinamarca, Colombia). *Archivos de Medicina (Manizales)*, 17(2), 319–325. <https://doi.org/10.30554/archmed.17.2.1979.2017>
- Berendonk, T. U., Manaia, C. M., Merlin, C., Fatta-Kassinos, D., Cytryn, E., Walsh, F., Bürgmann, H., Sørum, H., Norström, M., Pons, M.-N., Kreuzinger, N., Huovinen, P., Stefani, S., Schwartz, T., Kisand, V., Baquero, F., & Martinez, J. L. (2015). Tackling antibiotic resistance: The environmental framework. *Nature Reviews Microbiology*, 13, 310–317. <https://doi.org/10.1038/nrmicro3439>
- Buytaert, W., Céleri, R., De Bièvre, B., Cisneros, F., Wyseure, G., Deckers, J., & Hofstede, R. (2006). Human impact on the hydrology of the Andean páramos. *Earth-Science Reviews*, 79(1–2), 53–72. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2006.06.002>
- Chevez, Z. R., Dunn, L. L., da Silva, A. L. B. R., & Rodrigues, C. (2024). Prevalence of STEC virulence markers and Salmonella as a function of abiotic factors in agricultural water in the southeastern United States. *Frontiers in Microbiology*, 15. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1320168>

- Fetters, M. D., Curry, L. A., & Creswell, J. W. (2013). Achieving integration in mixed methods designs. *Health Services Research*, 48(6), 2134–2156. <https://doi.org/10.1111/1475-6773.12117>
- Fonseca-Carreño, N. E. (2021). Caracterización socioeconómica y biofísica de agroecosistemas en el municipio de Pasca en la provincia del Sumapaz-Cundinamarca. *Revista Científica Profundidad Construyendo Futuro*, 14, 2–13. <https://doi.org/10.22463/24221783.3159>
- Gomez-Jaramillo, Y., Berrouet, L., Villegas-Palacio, C., & Berrio-Giraldo, L. (2024). Conceptual framework for analyzing the sustainability of socio-ecological systems with a focus on ecosystem services that support water security. *Sustainable Development*, 32(3), 2298–2313. <https://doi.org/10.1002/sd.2780>
- Grey, D., & Sadoff, C. W. (2007). Sink or swim? Water security for growth and development. *Water Policy*, 9(6), 545–571. <https://doi.org/10.2166/wp.2007.021>
- Hokajärvi, A.-M., Tiwari, A., Räsänen, P., Wessels, L., Rankinen, K., Juntunen, J., Grootens, R. J. F., Kuronen, H., Vepsäläinen, A., Miettinen, I. T., Huttula, T., & Pitkänen, T. (2024). Campylobacter species, Salmonella serotypes and ribosomal RNA-based fecal source tracking in the Kokemäki River watershed. *Science of The Total Environment*, 954, 176559. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.176559>
- Huber, R., Bartkowski, B., Brown, C., El Benni, N., Feil, J.-H., Grohmann, P., Joormann, I., Leonhardt, H., Mitter, H., & Müller, B. (2024). Farm typologies for understanding farm systems and improving agricultural policy. *Agricultural Systems*, 213, 103800. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2023.103800>
- Instituto Colombiano Agropecuario (ICA). (n.d.). *Grupo de Inocuidad en la Producción Pecuaria Primaria y Bienestar Animal: Plan de vigilancia y monitoreo de resistencia antimicrobiana*. <https://www.ica.gov.co/areas/pecuaria/servicios/inocuidad-en-las-cadenas-agroalimentarias.aspx>
- Jolliffe, I. T., & Cadima, J. (2016). Principal component analysis: A review and recent developments. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 374(2065), 20150202. <https://doi.org/10.1098/rsta.2015.0202>
- Korajkic, A., McMinn, B. R., & Harwood, V. J. (2018). Relationships between Microbial Indicators and Pathogens in Recreational Water Settings. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(12), 2842. <https://doi.org/10.3390/ijerph15122842>
- Larsson, D. G. J., & Flach, C.-F. (2022). Antibiotic resistance in the environment. *Nature Reviews Microbiology*, 20, 257–269. <https://doi.org/10.1038/s41579-021-00649-x>
- Lopes, E. dos S., Ferreira Santaren, K. C., Araujo de Souza, L. C., Parente, C. E. T., Picão, R. C., Jurelevicius, D. de A., & Seldin, L. (2024). Cross-environmental cycling of antimicrobial resistance in agricultural areas fertilized with poultry litter: A one health approach. *Environmental Pollution*, 363, 125177. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.125177>
- Martak, D., Henriot, C. P., & Hocquet, D. (2024). Environment, animals, and food as reservoirs of antibiotic-resistant bacteria for humans: One health or more? *Infectious Diseases Now*, 54(4), 104895. <https://doi.org/10.1016/j.idnow.2024.104895>
- Octavianti, T., & Staddon, C. (2021). A review of 80 assessment tools measuring water security. *WIREs Water*, 8(3), e1516. <https://doi.org/10.1002/wat2.1516>
- Paredes, R., Damme, M., Mantilla, J., Castellanos, L. R., Clavijo, V., Celis, Y., Mehta, K., Kumar, A., Patiño, A., & Jeyashree, K. (2023). Prevalence and antimicrobial resistance of Escherichia coli and Salmonella spp. in animal feed in Colombia. *Revista Panamericana de Salud Pública*, 47, 1. <https://doi.org/10.26633/RPSP.2023.57>
- Posada-Perlaza, C. E., Ramírez-Rojas, A., Porras, P., Adu-Oppong, B., Botero-Coy, A.-M., Hernández, F., Anzola, J. M., Díaz, L., Dantas, G., Reyes, A., & Zambrano, M. M. (2019). Bogotá River anthropogenic

- contamination alters microbial communities and promotes spread of antibiotic resistance genes. *Scientific Reports*, *9*(1), 11764. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-48200-6>
- Rey-Romero, D. C., Domínguez, I., & Oviedo-Ocaña, E. R. (2022). Effect of agricultural activities on surface water quality from páramo ecosystems. *Environmental Science and Pollution Research*, *29*, 83169–83190. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-21709-6>
- von Elm, E., Altman, D. G., Egger, M., Pocock, S. J., Gøtzsche, P. C., & Vandenbroucke, J. P. (2007). The Strengthening the Reporting of Observational Studies in Epidemiology (STROBE) Statement: Guidelines for Reporting Observational Studies. *PLoS Medicine*, *4*(10), e296. <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.0040296>
- Ward Jr., J. H. (1963). Hierarchical grouping to optimize an objective function. *Journal of the American Statistical Association*, *58*(301), 236–244. <https://doi.org/10.1080/01621459.1963.10500845>
- Wilkes, G., Edge, T., Gannon, V., Jokinen, C., Lyautey, E., Medeiros, D., Neumann, N., Ruecker, N., Topp, E., & Lapen, D. R. (2009a). Seasonal relationships among indicator bacteria, pathogenic bacteria, *Cryptosporidium* oocysts, *Giardia* cysts, and hydrological indices for surface waters within an agricultural landscape. *Water Research*, *43*(8), 2209–2223. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2009.01.033>
- Wilkes, G., Edge, T., Gannon, V., Jokinen, C., Lyautey, E., Medeiros, D., Neumann, N., Ruecker, N., Topp, E., & Lapen, D. R. (2009b). Seasonal relationships among indicator bacteria, pathogenic bacteria, *Cryptosporidium* oocysts, *Giardia* cysts, and hydrological indices for surface waters within an agricultural landscape. *Water Research*, *43*(8), 2209–2223. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2009.01.033>
- World Health Organization. (2022). *Guidelines for Drinking-Water Quality: Fourth Edition Incorporating the First and Second Addenda*. World Health Organization. <https://iris.who.int/server/api/core/bitstreams/4a3dc8a4-9f08-4d62-b7ec-96d70be6b177/content>
- World Health Organization. (2026). *Guidelines for drinking-water quality: Fourth edition incorporating the first, second and third addenda*.
- Yenew, C., Temesgen, A., Gebeyehu, A. A., Enawgaw, A. S., Yemata, G. A., Ejigu, A. G., Tsega, T. D., Yeshiwas, A. G., Anteneh, R. M., Yigzaw, Z. A., Yirdaw, G., Tsega, S. S., Kebede, A. M., Mekonnen, B. A., Alemayehu, M. A., Mekonen, H., Ahmed, A. F., Asmare, Z. A., & Bayeh, G. M. (2025). One Health-related risk factors and seasonal variations in zoonotic bacteriological contamination of livestock water sources. *Scientific Reports*, *15*(1), 44464. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-28199-9>