

# Identificación participativa de zonas potenciales de recarga hídrica en la microcuenca Cune, Cundinamarca – Colombia

*Participatory Identification of Potential Water Recharge Zones in the Cune Micro-Basin, Cundinamarca – Colombia*

Eva-D. Díaz-Ibañez<sup>a</sup>, Cristian-S. Hernández-Ordoñez<sup>b</sup>,  
Henry Polanco-Méndez<sup>a</sup>, Lady J. Califa<sup>a, c</sup>

## RESUMEN

La identificación y delimitación de zonas de recarga hídrica en una cuenca son importantes en la gestión del recurso hídrico, sin embargo, la escasa implementación de metodologías prácticas y participativas que contribuyan al conocimiento del proceso y la ubicación de las zonas de recarga por parte de los actores locales dificultan su conservación. El objetivo de este trabajo fue identificar participativamente áreas con una posible recarga hídrica potencial en la microcuenca quebrada Cune, del municipio de Villeta-Cundinamarca, aplicando un modelo metodológico que incluyó e integró el conocimiento técnico y científico con el saber local de las comunidades rurales. Se identificaron cinco (5) zonas potenciales de recarga hídrica y se representaron en un mapa participativo. El programa ArcView<sup>®</sup> fue utilizado para validar la metodología, permitiendo establecer comparaciones entre el mapa participativo con el mapa obtenido técnicamente. El mapa de zonas potenciales de recarga hídrica obtenido, indica que el 71,31%, del área total de la microcuenca corresponden a zonas categorizadas con una posibilidad de recarga moderada y alta. Adicionalmente, se presenta bastante concordancia entre las categorías de clasificación de zonas de recarga hídrica identificadas por los actores locales con las identificadas técnicamente. El mapa de zonas potenciales de recarga hídrica elaborado en este estudio se propone como una herramienta que contribuye a la gestión ambiental participativa y la planificación local en el manejo de los recursos hídricos subterráneos del área de estudio.

**PALABRAS CLAVE:** acuífero; participación comunitaria; infiltración; recursos hídricos; recarga hídrica.

## ABSTRACT

The identification and delimitation of water recharge zones (WRZ) in a basin are key factors for water resource management; however, there is a poor knowledge on practical and participatory methodologies for local populations to contribute to conservation issues. Then, the aim of this work was to participatively identify potential water recharge zones in Cune's stream micro-basin, at Cundinamarca, Colombia, based on local knowledge. A methodological model integrating technical and scientific knowledge with the local framework was done. Five (5) potential water recharge zones were identified and represented on a participatory map. The ArcView<sup>®</sup> software was used to confirm the method, allowing to set up comparisons between the participatory map with the technical one. The potential WRZ map showed a correspondence level of 71.31% of moderate and high WRZ in the micro-basin area. Additionally, there is considerable agreement between the categories of classification of WRZ identified by local actors with those technically identified. The potential map WRC proposed a tool for participatory environmental management and local planning in the management of groundwater resources in this study.

**KEY WORDS:** groundwater; community participation; infiltration, water resources; water recharge.

a Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA). Bogotá, Colombia. ORCID Díaz-Ibañez, E-D.: 0000-0002-4613-7868; ORCID Polanco-Méndez, H.: 0000-0003-0559-6635; Califa, L.J.: 0000-0003-2417-3937

b Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA), Centro de Desarrollo Agroindustrial y Empresarial. Villeta, Colombia. ORCID Hernández-Ordoñez, C.-S.: 0000-0002-7874-6510

c Autor de correspondencia: lcalifa@gmail.com

## Introducción

Las zonas de recarga hídrica son territorios con capacidad de infiltrar de forma natural el agua procedente de la precipitación o escorrentía superficial, y con ello, permiten alimentar acuíferos donde los flujos subterráneos se desplazan horizontalmente hacia los diferentes cuerpos de agua como lagos, ríos, manantiales y océanos (INAB, 2015). El proceso de recarga de agua subterránea forma parte del grupo de servicios ecosistémicos denominado servicios de soporte y de provisión hídrica considerado fundamental en el mantenimiento de los ecosistemas terrestres y acuáticos, al igual que en el bienestar humano. Sin embargo, el crecimiento de la población y la expansión de las tierras agrícolas han ocasionado el aumento de la demanda de agua subterránea, el deterioro de su calidad y la afectación del proceso de recarga hídrica (Watto, 2015; Mondal y Dalai, 2017).

Actualmente, es necesario incorporar el agua subterránea a la gestión integral del recurso hídrico, puesto que esta forma alrededor del 96% del recurso total de agua dulce disponible en el planeta con una menor susceptibilidad a procesos de contaminación (IDEAM, 2015; (Sandoval y Tiburan, 2019), y cada vez más representan la única fuente para satisfacer las demandas de actividades económicas, especialmente de la agricultura (NGWA, 2015), no obstante, el desconocimiento de los sitios con potencial para la recarga hídrica, es lo que provoca, en muchas ocasiones, que los actores locales o las mismas instituciones encargadas de gestionar el recurso hídrico no tomen las medidas adecuadas para evitar que estas zonas se deterioren y disminuyan su capacidad de infiltración (González y López, 2018).

Por otro lado, la recarga hídrica corresponde a un proceso de difícil reconocimiento por parte de los actores locales y a causa de su naturaleza oculta, una mayor explotación en los últimos años y la falta de conocimiento entre sus sistemas de gestión entre la comunidad científica y las partes interesadas generan una barrera crítica que dificulta desarrollar una gobernanza adecuada en el territorio (López-Corona et al., 2013; Bhattacharjee et al., 2019).

Existen diferentes metodologías para realizar la identificación de zonas de recarga hídrica que se basan en elementos cuantitativos y cualitativos, entre

ellos se encuentran el método de balance de agua (Vélez y Vásquez, 2004), el método de balance hídrico de suelos (Flores y Ruíz, 1998; Schosinsky, 2006; Mora y Ruiz, 2018), los análisis hidrogeoquímicos e isotópicos (Kendall y Caldwell, 1998; Glynn y Plummer, 2005), la modelación numérica (Joyce et al., 2014), entre otros, que consisten en estudios hidrogeológicos especializados, altamente técnicos y de elevados costos, que generalmente no están dentro de las posibilidades económicas o al alcance del conocimiento de las comunidades de una microcuenca o subcuenca.

En este contexto se presentan un gran número de investigaciones para identificar las zonas con potencial de recarga hídrica, en países de Centro de América, como es Panamá, Costa Rica, Nicaragua, Guatemala, El Salvador y la Isla de Cuba (Figueredo, 2019); siendo Costa Rica el país pionero en el recurso hídrico subterráneo (Figueredo, 2019), contrariamente en Colombia, no hay suficientes estudios acerca de la identificación de zonas de recarga hídrica, es de recalcar que el Estudio Nacional del Agua, 2018 (IDEAM, 2019) afirma que solo se tiene identificado el 30,8 % de sistemas acuíferos con un nivel de conocimiento suficiente para la gestión de las aguas subterráneas, y del restante, que corresponde al 69,2 % del total, en los últimos años no se ha logrado generar información hidrogeológica detallada que permita la caracterización de estos sistemas acuíferos como soporte suficiente para la planificación y manejo integral del recurso hídrico subterráneo.

En este orden de ideas, el Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE) de Costa Rica desarrolló una metodología propuesta por Matus (2007) de bajo costo, de aplicación simple y sustentada en la gestión participativa de los actores locales para la identificación de las zonas de recarga de aguas subterráneas, a partir de la evaluación de los siguientes elementos biofísicos: pendiente y microrelieve, tipo del suelo, tipo de roca, cobertura vegetal y uso del suelo. Esta propuesta metodológica tiene como finalidad contribuir a la gestión ambiental participativa en el manejo de los recursos hídricos locales, integrando el conocimiento técnico y científico con el saber local de las comunidades rurales quienes conocen su territorio, acceden y usan

los recursos naturales ofertados en el ecosistema, además de generar conciencia de la importancia de estas áreas para su protección y conservación.

En el contexto de cuenca, una gestión inadecuada de las zonas de recarga hídrica conduce a enfrentar a mediano y largo plazo periodos de sequía que afectarán negativamente el abastecimiento de agua para consumo humano y la producción agropecuaria (Jarro et al., 2019). En Colombia, la mayor parte de la población se encuentra asentada en las partes altas de las cordilleras, donde se prevén problemas de escasez hídrica e inestabilidad de suelos, en gran parte por el cambio climático, junto a la falta de gobernanza local y la falta de políticas públicas y acciones conjuntas de protección y gestión adecuadas y oportunas (IRENA, 2012).

La microcuenca Cune pertenece a la cuenca del río Negro localizada en el flanco occidental de la cordillera Oriental de los Andes colombiano (CAR, 2009), según IRENA (2012), las zonas de recarga hídrica de la microcuenca presentan una presión por actividades antrópicas, así como un aumento en la población de la región y un uso del agua no concesionado ni regulado (riego, pecuario, piscícola, doméstico, turístico), que afectan la disponibilidad del recurso hídrico, debido a que la microcuenca del río Cune abastece el acueducto del municipio de Villeta, en donde ya existe un déficit del recurso hídrico evidenciado en el racionamiento de agua que sufre el casco urbano.

Con base a esta información, el objetivo del presente estudio fue identificar zonas con potencial de recarga hídrica (ZPRH) en la microcuenca Cune del municipio de Villeta, a partir de la metodología participativa propuesta por el autor Matus (2007), involucrando y empoderando a los actores locales, generando información que permita contribuir a la gestión sostenible del recurso hídrico subterráneo, debido a que no existen suficientes estudios que aborden la aplicación de métodos participativos para la identificación de ZPRH, además de generar estrategias de gestión ambiental para el municipio que promueva la adquisición de predios de importancia ambiental dando prioridad al recurso agua.

## Materiales y métodos

El presente estudio se llevó a cabo en la microcuenca quebrada Cune, localizada al noroccidente del municipio de Villeta en el departamento de Cundinamarca de la República de Colombia, dentro de las siguientes coordenadas extremas: 05°00'54",905 N, 74°28'02",548 W; 05°04'14",45 N, 74°30'33",48 W; 05°03'51",124 N, 74°32'54",47 W; 5°00'43",597 N, 74°28'39",551W (Vega, 2014) (Figura 1).

El área de estudio se encuentra conformada por las veredas Cune, La Esmeralda, San Isidro, Salitre blanco, ladera norte de Quebrada Honda y la Masata, y hace parte del sistema hidrológico de la subcuenca del río Villeta, perteneciente a la cuenca del río Negro, tributario del río Magdalena, comprendido por zonas predominantes montañosas que se incorporan a la Cordillera Oriental de los Andes Colombianos (Cifuentes y Mayorga, 2015).

Las veredas Salitre Blanco, Cune, San Isidro y la Esmeralda tienen acueductos veredales con permiso de captación de la quebrada Cune, por parte de la autoridad ambiental CAR y el uso de agua autorizado es con fines domésticos, agrícolas y pecuarios (León y Rodríguez, 2016). Los sistemas productivos de las veredas de San Isidro y La Esmeralda se abastecen de agua de nacimientos locales, los cuales se alimentan con la recarga hídrica superficial de las zonas altas de las reservas forestales protectoras de San Francisco y La Esmeralda (IRENA, 2012).

La microcuenca posee una longitud de 16,12 km y un área total de 2.998,92 ha que representan el 21,3% del área municipal, presenta un rango altitudinal comprendido entre 800 y 2.000 msnm, su temperatura oscila entre los 18°C y 24°C y sus precipitaciones promedio anuales son de 1.000 a 2.000 mm (Cifuentes y Mayorga, 2015). El área alta de la microcuenca tiene una cota superior de 2.000 msnm, y se caracteriza por presentar una alta densidad de drenajes (Alcaldía Municipal de Villeta, 2000). En el área de estudio, predominan las actividades agroindustriales destinadas al pastoreo, silvicultura, actividades agrícolas y pecuarias, desarrolladas bajo esquemas de economía familiar y de

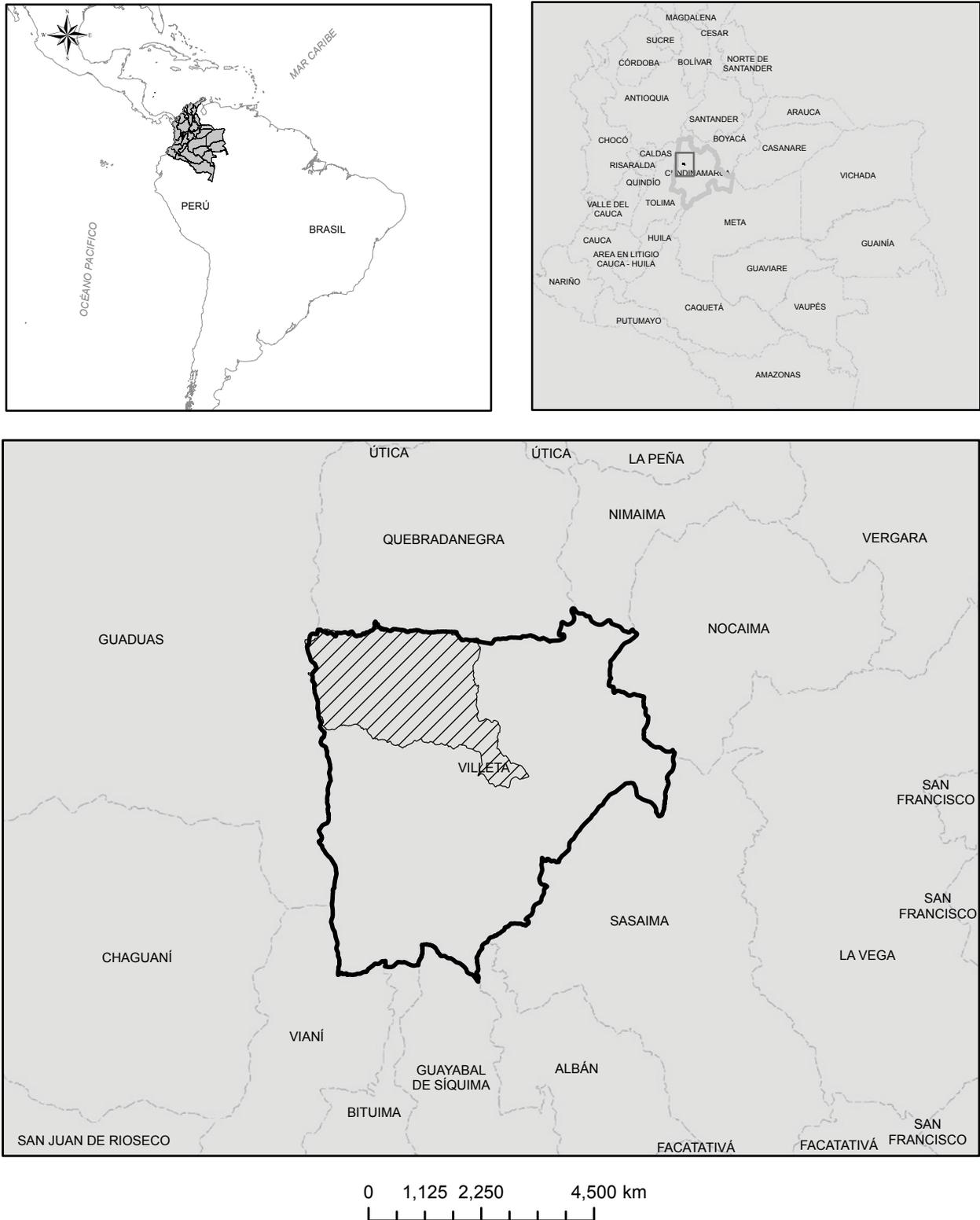


Figura 1. Ubicación geográfica de la microcuenca Cune. Fuente: elaboración propia

subsistencia (Ortiz, 2014). En general, el paisaje se encuentra impactado principalmente por la ampliación de la frontera agrícola y pecuaria.

La metodología empleada en esta investigación se fundamentó en la propuesta de Matus (2007) del CATIE, adaptada para el presente estudio referente a las herramientas cartográficas y educativas empleadas para explicar e identificar zonas de recarga hídrica. La metodología se basó en el análisis y evaluación práctica en campo de cinco elementos biofísicos: pendiente y microrelieve, tipo de suelo, tipo de roca, cobertura vegetal y uso del suelo. A cada elemento se le asignó una ponderación que osciló de 1 a 5, dependiendo de las características del sitio evaluado, donde 1 corresponde a una posibilidad de recarga muy baja y 5 una posibilidad muy alta (Tabla 1). Una vez obtenido el resultado de cada uno de los parámetros, se procedió a realizar el cálculo de la ZPRH mediante la Ecuación (1) del modelo participativo

$$ZR = [0,27(Pend) + 0,23(Ts) + 0,12(Tr) + 0,25(Cve) + 0,13(Us)] \quad (1)$$

donde, *ZR* es la zona de recarga hídrica; *Pend* la pendiente y microrelieve, *Ts* el tipo de suelo, *Tr* el tipo de roca, *Cve* la cobertura vegetal y *Us* el uso del suelo.

La metodología se realizó en tres fases, pre-campo, campo y post-campo, descritas a continuación.

### Fase de pre-campo

La primera fase se realizó teniendo en cuenta el reconocimiento de la microcuenca a través de recorridos en campo y el mapa de coberturas terrestres de la microcuenca Cune del año 2017<sup>1</sup>, junto con la cartografía base a escala 1:10.000 del IGAC impreso en un plano tamaño pliego (100 x 70 cm), el

1 El mapa de coberturas terrestres de la microcuenca Cune *Corine Land Cover* se realizó en el marco de la investigación, "Valoración participativa de servicios ecosistémicos para la conservación de la biodiversidad en la microcuenca Cune" desarrollada en el año 2017-2019, la cual fue financiada por el Sistema de Investigación, Innovación y Desarrollo Tecnológico (SENNOVA) del Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA) y asesorada académicamente por la Maestría en Conservación y Uso de la Biodiversidad de la Pontificia Universidad Javeriana y el apoyo del semillero ECONARE.

mapa fue empleado como insumo cartográfico en el desarrollo de los talleres participativos para la identificación de ZRH. La elaboración del mapa de coberturas terrestres se realizó por medio de la adquisición de imágenes satelitales tipo *RapidEye* año 2017 con una resolución de 5 m con un área de 50.000 ha.

### Fase de campo

**Talleres participativos:** Se convocaron las comunidades rurales de las seis veredas que conforman la microcuenca Cune, y se realizaron cinco talleres participativos entre los meses de julio a noviembre del año 2019, asistiendo un total de 67 habitantes locales. En cada uno de los talleres se empleó el siguiente procedimiento:

- 1) Se analizaron y socializaron los conceptos básicos relacionados al manejo de cuencas hidrográficas, ciclo del agua y zonas de recarga hídrica a través de fichas didácticas y el uso de una herramienta educativa y participativa de la Corporación Autónoma Regional (CAR) denominada "Cuida tu cuenca"<sup>2</sup>.
- 2) Se realizó una charla de inducción donde se explicaron los criterios prácticos expuestos por Matus (2007) requeridos para la identificación de las áreas posibles de recarga hídrica.
- 3) Se empleó el diagrama de cuenca y el mapa de recursos naturales y uso de la tierra como herramientas participativas complementarias de acuerdo con Geilfus (2002) para que los participantes identificaran y ubicaran los principales cuerpos de agua, nacimientos, áreas de importancia ecológica y usos del suelo de su territorio.
- 4) La comunidad ubicó las posibles ZRH en la microcuenca a partir de las cinco variables biofísicas descritas en la Tabla 1, empleando como insumo cartográfico el mapa de coberturas terrestres de la microcuenca Cune (2017).

2 La herramienta educativa denominada "Cuida tu cuenca" hace parte del programa de formación en herramientas pedagógicas ambientales para el desarrollo participativo de procesos de educación impartida por la Dirección de Cultura Ambiental de la Corporación Autónoma Regional (CAR), Cundinamarca.

**Tabla 1.** Ponderación de la posibilidad de recarga para cada elemento biofísico del modelo propuesto por Matus (2007)

Elemento biofísico						Posibilidad de recarga	Ponderación
Microrelieve	Pendiente	Tipo de suelo	Tipo de roca	Tipo de cobertura	Uso del suelo		
Plano a casi plano, con o sin rugosidad	0 - 6	Suelos franco-arenosos a arenosos	Rocas muy permeables, muy suaves, constituidas por cristales o agregados gruesos, con macroporos interconectados; por ejemplo, arena gruesa, piedra pómez, grava o cascajo	>80	Bosque donde se dan los tres estratos: árboles, arbustos y hierbas o zacate denso	Muy alta	5
Moderadamente ondulado o cóncavo	6 - 15	Suelos francos	Rocas permeables, suaves, constituidas por cristales o agregados medianos, con poros interconectados; por ejemplo, arena fina o arenisca con poca cementación	70 - 80	Sistemas agroforestales o silvopastoriles	Alta	4
Ondulado/ Cóncavo	15 - 45	Suelos franco-limosos	Rocas moderadamente permeables, semisuaves, con regular conexión entre poros	50 - 70	Terrenos cultivados y con obras de conservación de suelos y agua	Moderada	3
Escarpado	45 - 65	Suelos franco-arcillosos	Rocas poco permeables, un poco duras, moderadamente compactadas, constituidas por partículas finas, con presencia de fracturas interconectadas; por ejemplo, la combinación de gravas con arcillas	30 - 50	Terrenos cultivados sin ninguna obra de conservación de suelos y agua	Baja	2
Fuertemente escarpado	>65	Suelos arcillosos	Rocas impermeables, duras, cementadas, compactadas, constituidas por partículas muy finas, sin presencia de fracturas	<30	Terrenos agropecuarios con manejo intensivo	Muy baja	1

Fuente: Matus (2007)

**Análisis y evaluación de los elementos del modelo propuesto:** La validación de las zonas de recarga hídrica identificadas en los talleres participativos se realizó mediante recorridos de campo junto a los actores locales. Para cada área de recarga hídrica identificada se evaluaron los cinco elementos biofísicos del modelo propuesto por Matus (2007). Complementariamente, se realizaron pruebas de infiltración

mediante un infiltrómetro de anillo simple para medir la infiltración acumulada en función del tiempo y determinar la clase de permeabilidad de los suelos y la velocidad en la que se infiltra el agua, con el fin de asignar un parámetro adicional para comprobar la posibilidad de recarga hídrica final, de acuerdo con lo sugerido en la metodología propuesta por Matus (2007) (Tabla 2).

**Tabla 2.** Clase de permeabilidad de los suelos

Clase de permeabilidad de los suelos	Índice de permeabilidad	
	cm h <sup>-1</sup>	cm d <sup>-1</sup>
Muy lenta	Menos de 0,13	Menos de 3
Lenta	0,13 - 0,3	3 - 12
Moderadamente lenta	0,3 - 2,0	12 - 48
Moderada	2,0 - 6,3	48 - 151
Moderadamente rápida	6,3 - 12,7	151 - 305
Rápida	12,7 - 25	305 - 600
Muy rápida	Mayor de 25	Mayor de 600

Fuente: Matus (2007)

## Fase de post-campo

**Elaboración del mapa participativo de ZPRH:** Con la ponderación de cada elemento biofísico evaluado en las áreas identificadas por las comunidades de la microcuenca Cune y aplicando la ecuación (1), se generó el mapa participativo de ZPRH. El mapa se elaboró georreferenciando los puntos límites de las áreas identificadas; dichos puntos se bajaron al programa ArcView®, donde se elaboraron los polígonos para cada zona y el mapa donde se ubican las ZPRH.

**Caracterización de las zonas identificadas participativamente:** Posteriormente, se realizó la caracterización de cada zona evaluada, a partir de la descripción de los elementos biofísicos, para que las comunidades puedan tener un mejor conocimiento de la ubicación de estas áreas, conocer aquellas

características que puedan estar afectando la recarga hídrica, y generar acciones que permitan mejorar o potenciar el proceso de recarga.

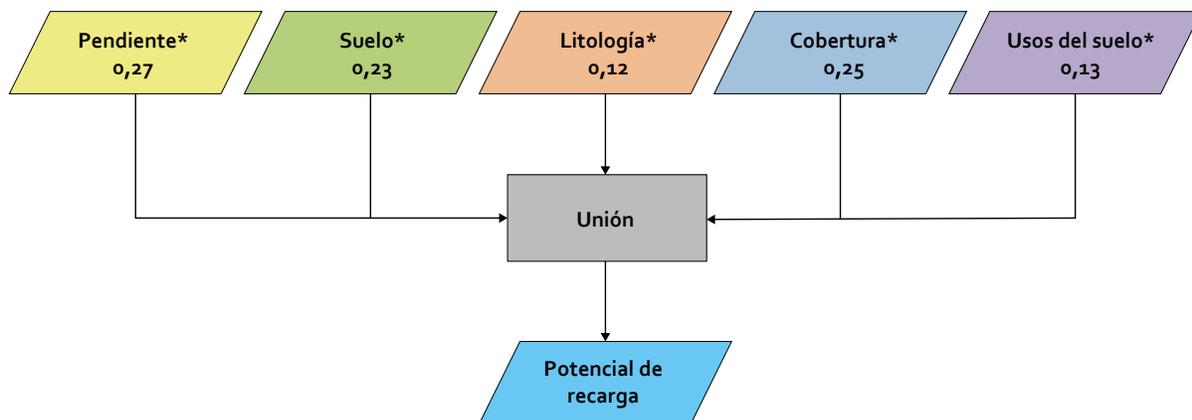
**Comparación de áreas de recarga hídrica identificadas participativamente con áreas identificadas técnicamente:** Se elaboró el mapa técnico realizando la valoración de los diferentes parámetros biofísicos a través de diferentes capas para consolidar la capa potencial de recarga hídrica. La información de cada elemento biofísico mencionado se obtuvo a partir del mapa de suelos de Cundinamarca a escala 1:100.000, del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) y del mapa de coberturas terrestres CLC nivel 3 (2017) (Figura 2).

Con el fin de validar la metodología y establecer comparaciones entre los mapas resultantes de ZPRH identificada por los actores locales y mediante ArcView®, se procedió a realizar la superposición de las unidades de mapeo mediante el procedimiento unión en Arcgis, con el fin de realizar la unificación de las capas y proceder a la aplicación de la ecuación (1).

## Resultados

Selección de las zonas de recarga hídrica identificadas y su ponderación obtenida por cada factor biofísico

Los resultados obtenidos de la realización de los talleres participativos permitieron determinar el número de ZPRH identificadas por las comunidades,



**Figura 2.** Diagrama de generación de la capa de potencial de recarga. \* coeficientes de la propuesta de Matus (2007), ver ecuación (1). Fuente: elaboración propia

según este método participativo de investigación se identificaron cinco posibles zonas para ser evaluadas (Figura 3). Cada una de estas zonas arrojó

ponderaciones diferentes de acuerdo con el estudio realizado por cada factor biofísico (Figura 4).

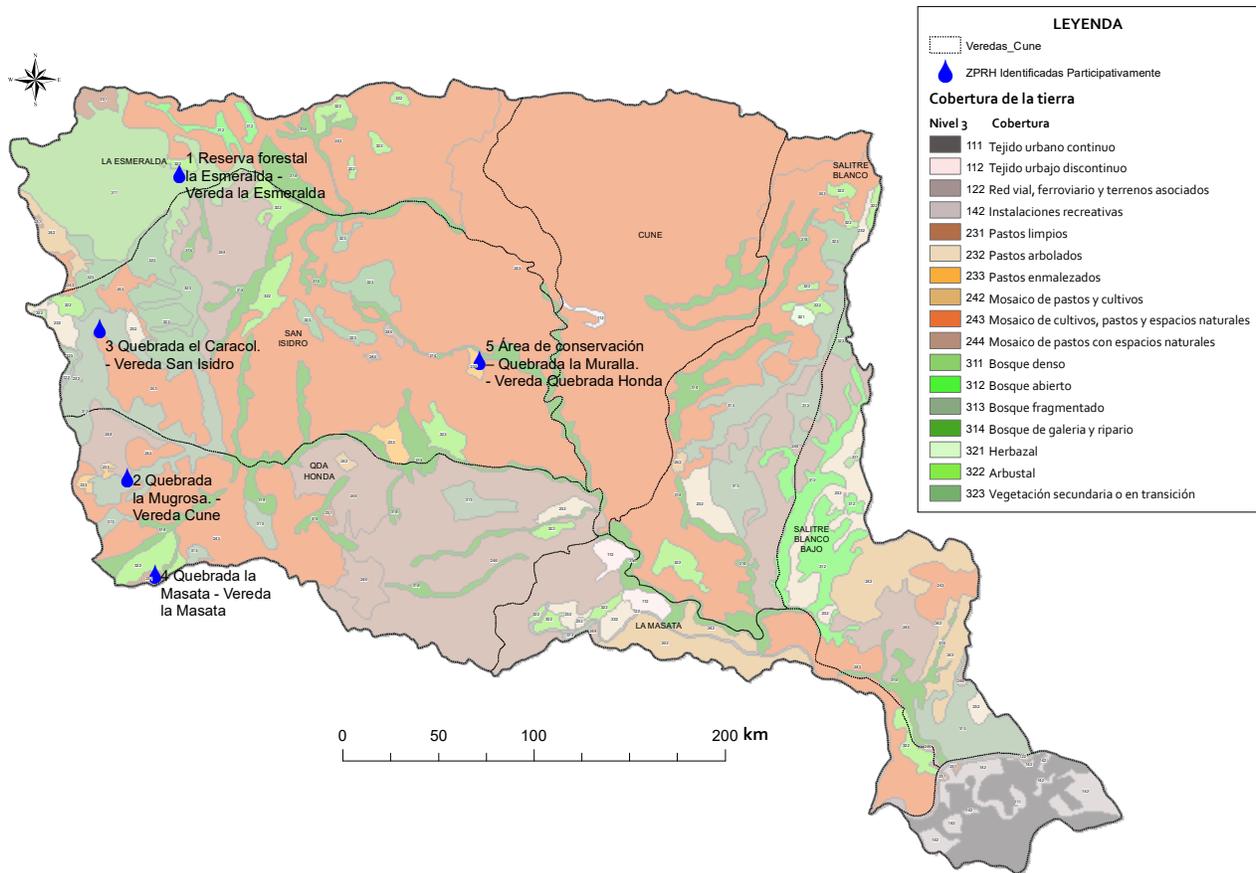


Figura 3. Mapa participativo de zonas potenciales de recarga hídrica, microcuenca Cune. Fuente: elaboración propia

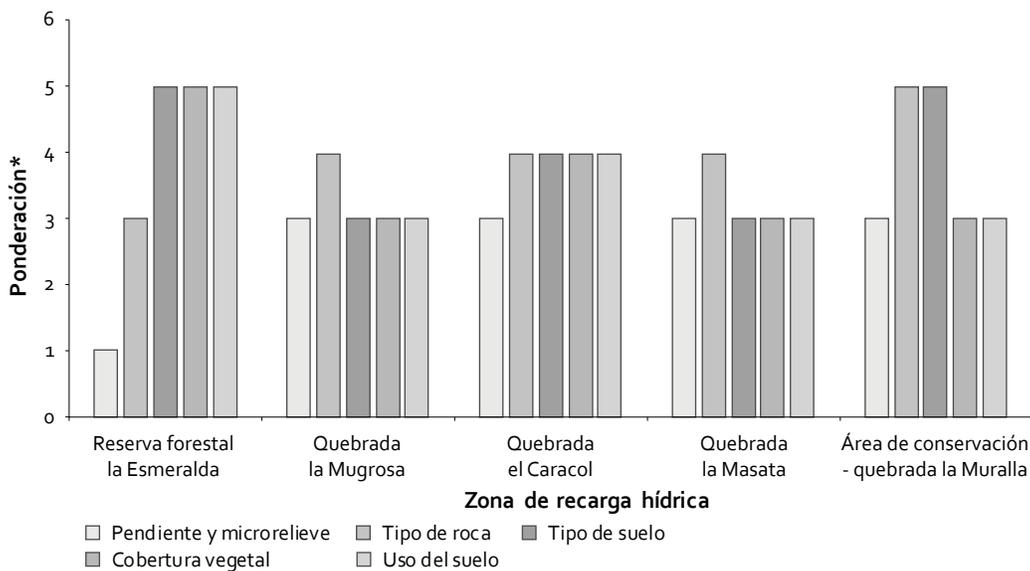


Figura 4. Ponderación de cada factor biofísico por zona de recarga hídrica. \* La ponderación oscilaba entre 1 a 5, donde 1 es muy baja, 2 baja, 3 regular, 4 alta y 5 muy alta. Fuente: elaboración propia

## Puntuación final obtenida para cada zona de recarga hídrica por factor biofísico evaluado

Con cada una de las ponderaciones obtenidas por las ZRH se aplicó la ecuación propuesta dentro de la metodología para determinar la puntuación final de cada elemento biofísico (Figura 5).

La microcuenca quebrada Cune posee dos tipos de posibilidad de recarga hídrica en las áreas evaluadas, estas oscilan desde la posibilidad de recarga moderada hasta la posibilidad de recarga alta, predominando las ZPRH alta.

La posibilidad de recarga hídrica moderada se presentó en los nacaderos de las quebradas la Mugrosa y la Masata, las cuales presentaron un promedio de posibilidad de 3,12 ya que poseen superficies orientadas a la conservación del suelo y agua, limitan con terrenos de uso agropecuario, donde predomina una cobertura vegetal permanente que va desde 50 a 70% donde se presentan los tres estratos arbóreos dispersos y un bosque en estado de sucesión. Son áreas que se encuentran en terrenos ondulados/cóncavos con texturas franco-limosas y rocas permeables.

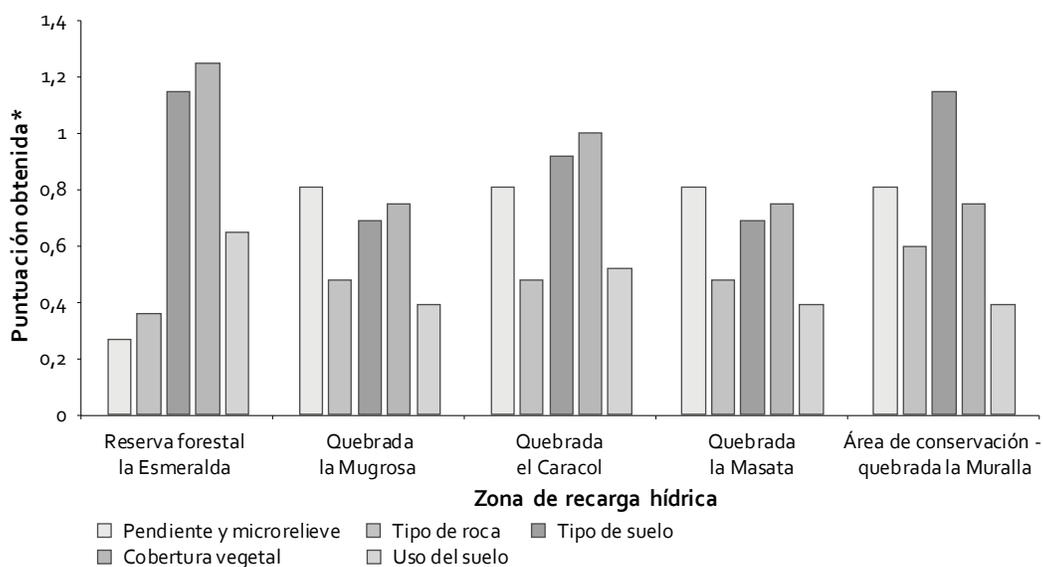
Las ZPRH alta se localizaron en el nacedero el Caracol, el área de conservación de la quebrada la Muralla y la reserva forestal la Esmeralda con un rango de posibilidad de 3,68 a 3,73. Estas son áreas

que se encuentran en terrenos ondulados/cóncavos con texturas de tipo franco arenosos y francos con partes iguales de arena, limo y arcilla, con rocas permeables y moderadamente permeables. El uso del suelo es de tipo agropecuario con obras de conservación de suelo y agua, la cobertura vegetal permanente va desde 70% hasta más del 80%, en la zona predominan bosques densos naturales con presencia de los tres estratos arbóreos y sistemas agroforestales.

La Figura 6 presenta la clase de permeabilidad del suelo en cada área evaluada y su capacidad de infiltración, esto como un factor que contribuye a la recarga natural de agua procedente de la precipitación que se infiltra en el suelo y llega hasta los estratos más profundos, acuíferos. Apoyando los resultados obtenidos según el modelo propuesto en donde la permeabilidad de una zona evaluada ratifica el potencial de recarga obtenido.

## Transposición del mapa participativo con el mapa técnico de zonas potenciales de recarga hídrica

Al comparar las ZPRH identificadas participativamente, con las áreas potenciales de recarga hídricas obtenidas técnicamente (Figura 7), se identificaron cinco categorías de posibilidad de recarga hídrica en la Microcuenca Cune, predominando la



**Figura 5.** Valores de los criterios evaluados por zona de recarga hídrica. \* La puntuación final de cada zona de recarga hídrica se obtiene a través de la Ecuación (1). Fuente: elaboración propia

posibilidad moderada (55,39%), seguida por una baja posibilidad de recarga (17,01%), alta posibilidad (15,92%), muy baja posibilidad (8,58%) y muy alta posibilidad (3,11%), clasificando la microcuenca por sus características biofísicas como una zona adecuada para que ocurra el proceso de recarga hídrica

e infiltración, ya que el (71,31%) del área total se ubica en las categorías moderada y alta posibilidad de recarga. Específicamente para cada una de las zonas evaluadas, se obtuvo concordancia entre ambas clasificaciones como lo muestra la Tabla 3.

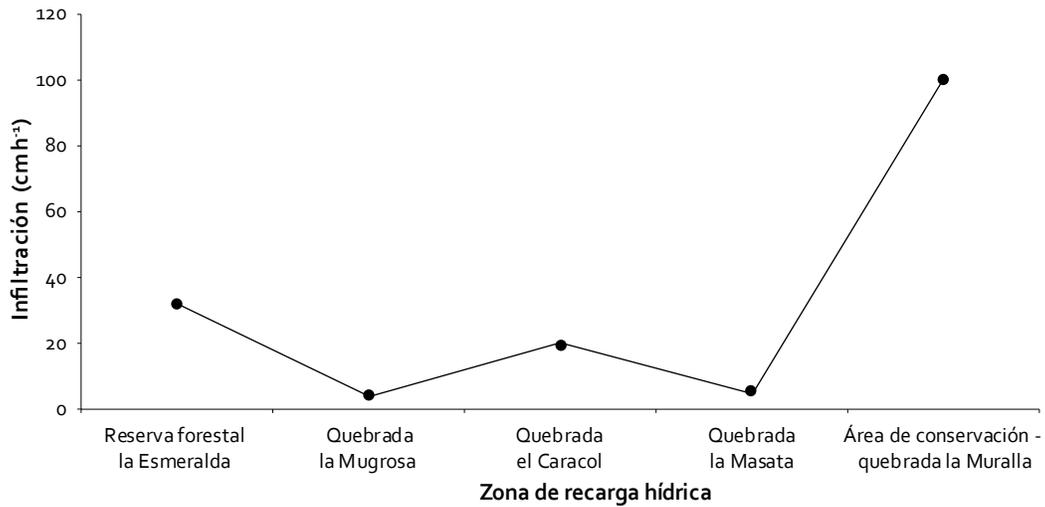


Figura 6. Capacidad de infiltración de las zonas evaluadas en la microcuenca Cune. Fuente: elaboración propia

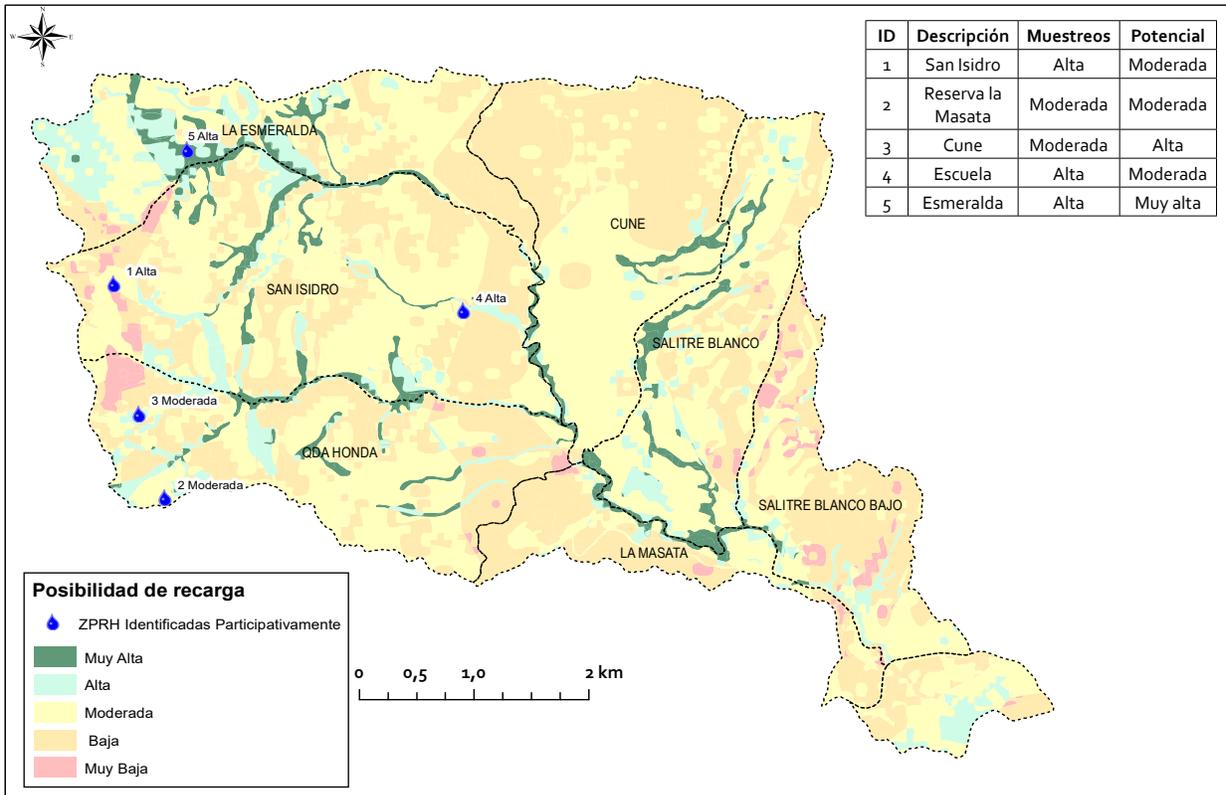


Figura 7. Mapa técnico de ZPRH de la Microcuenca Cune. Fuente: elaboración propia

**Tabla 3.** Comparación de la posibilidad de recarga hídrica Microcuenca Cune

Vereda	Zona de recarga hídrica	Posibilidad de recarga según la metodología participativa	Posibilidad de recarga hídrica según el mapa generado con ArcGIS®
La Esmeralda	Reserva forestal la Esmeralda	Alta	Muy alta
Cune	Quebrada la Mugrosa	Moderada	Alta
San Isidro	Quebrada el Caracol	Alta	Moderada
La Masata	Quebrada la Masata	Moderada	Moderada
Quebrada Honda	Área de conservación – Quebrada la Muralla	Alta	Moderada

Fuente: elaboración propia

## Discusión

Los resultados de la investigación indican que cuatro de las ZRH evaluadas en la microcuenca Cune presentaron una pendiente y un microrelieve con características iguales. Solo la reserva forestal la Esmeralda localizada en la parte más alta de la Microcuenca, presentó una pendiente fuertemente escarpada, que según Bardales (2010) favorece la escorrentía superficial aumentando los procesos de erosión. No obstante, hay que tener en cuenta que la cobertura vegetal influye en este proceso y su capacidad de infiltración puede variar (Matus, 2007). La cobertura vegetal permanente de la reserva fue >80% donde predominó el bosque denso natural, permitiendo un mayor tiempo de contacto del agua con el suelo, aumentando así la capacidad de infiltración del área pese a que su pendiente fue desfavorable para este proceso. Según Matus (2007) entre mayor sea la cobertura vegetal, con más estratos en una zona, mayor será la recarga hídrica y mejor se conservan las características del suelo. Incluso, Stadmüller (1994) asegura que las raíces de los árboles forman una serie de canales que ayudan a la infiltración y a la percolación del agua. Sin embargo, González y López (2018) mencionan que la cobertura vegetal presente en las demás zonas de recarga hídrica donde predominan tacotales, vegetación arbustiva y árboles dispersos con pasto, presentan una posibilidad de recarga hídrica moderada dado que hay presencia de vegetación combinada.

El tipo de suelo determinó la posibilidad de recarga hídrica para cada zona evaluada, tres zonas con capacidad de recarga hídrica alta presentaron una textura franco-arenosa, que es considerada ideal

para este proceso porque tiene una mezcla equilibrada de arena, limo y arcilla. Según Carhuachin (2014), esto supone un equilibrio entre permeabilidad al agua, retención de agua y de los nutrientes. Mientras que dos zonas arrojaron una capacidad de recarga moderada. Según Rucks et al. (2004), el suelo franco-limoso tiene mayor porosidad que el suelo franco-arenoso, pero el franco-limoso contiene una estructura pobre y tiene menos microporos que los otros suelos. Esto indica que la infiltración sería menor y por ende la capacidad de recarga de la zona disminuye.

Como un factor adicional al estudio y que permitió determinar la clase de permeabilidad de los suelos, se encuentra la capacidad de infiltración que arrojó resultados similares a la ecuación final del potencial de recarga hídrica, donde se obtuvo una zona con un índice de permeabilidad rápido, dos zonas muy rápido y dos con un índice moderado. Aquí se observó que la infiltración es influenciada por las propiedades físicas del tipo de roca y el tipo de suelo como lo son: textura, estructura, contenido de materia orgánica y grado de humedad; así como por la vegetación, topografía y estratificación geológica (Noriega, 2005; Chamorro, 2016) arrojando así un resultado completo para cada zona y que respalda el potencial de recarga hídrica obtenido en este trabajo.

El método participativo utilizado para la evaluación de ZRH, puede considerarse como una alternativa para municipios o comunidades que buscan identificar y conservar estas zonas, ya que se requieren de menos costos financieros y en algunos casos es posible contar con el apoyo de instituciones de educación superior y entidades ambientales, las

cuales brindan profesionales especializados en el tema que realizan un acompañamiento durante el proceso de ejecución, además diferentes herramientas de trabajo, reduciendo así costos para capacitar la comunidad. Matus et al. (2008) argumentan que para determinar y delimitar una zona con potencial de recarga hídrica se requieren estudios hidrogeológicos especializados, que muchas veces no están dentro de las posibilidades económicas de las comunidades de una microcuenca; por tanto, plantearon una metodología práctica, de bajo costo y de aplicación simple para identificar dichas zonas, aportando así una estrategia para conservar y proteger procesos como la recarga hídrica. Por otra parte, herramientas para el desarrollo participativo como la cartografía social se tuvieron en cuenta dentro de esta metodología, para contribuir a la apropiación de las comunidades sobre sus territorios. Según Fals Borda (1987), este tipo de herramientas son una técnica dialógica que permiten proponer, desde una perspectiva transdisciplinaria, preguntas y perspectivas críticas para abordar diferentes conflictos y temas ambientales.

Dentro de la ejecución de este proyecto se presentaron algunos inconvenientes relacionados con la participación de las comunidades en los talleres participativos para la identificación de ZPRH. Un factor que influyó en esta participación fue la pérdida de confianza de las comunidades en instituciones como la CAR, dificultando la creación de lazos de confianza y comunicación, a pesar de esto es importante resaltar que de los cinco talleres realizados la participación total fue de 67 actores locales en donde nunca el número de técnicos superó el número de personas de la comunidad, esto con el objetivo de tener un mejor diálogo que permitiera la expresión de las diferentes formas de pensar de cada integrante. Por otra parte, la falta de gobernanza y auto organización entre las comunidades dificulta la toma de decisiones. Autores como Reyes y Jara (2005) aseguran que la gobernanza es un proceso que conduce a la solución de conflictos ambientales mediante la toma de decisiones que permiten gestionar adecuadamente el acceso, uso o distribución de los recursos naturales. De ahí que los grupos sociales e instituciones se articulen para generar un bien común, en

este caso el uso adecuado y la conservación del recurso hídrico. Según Ostrom (2015), los proyectos relacionados con el trabajo en campo impulsan la importancia de líderes que movilizan la capacidad de participación de grupos, promoviendo prácticas de comunicación acerca de las visiones de los actores, la construcción institucional y de espacios de resolución de conflictos.

La investigación con un enfoque participativo ha demostrado que se pueden lograr buenos resultados, principalmente mediante la construcción de la capacidad de los líderes locales para mejorar el conocimiento compartido, mediante la combinación del conocimiento tanto en campo (con experiencia de vida) como con especialistas, y mediante una buena relación desarrollada dentro de la comunidad (Jadeja et al., 2018). Este enfoque implementado durante la ejecución del proyecto apoya el proceso de generar confianza dentro de la comunidad, que es, según Giest y Howlett (2014) y González y López (2018) la base para la gobernanza de los bienes comunes y el compromiso de la comunidad dentro de programas de investigación para la gestión de los recursos biológicos y la sostenibilidad de los sistemas de producción.

Esta investigación destaca como en una cuenca o microcuenca hidrográfica se conjugan elementos bióticos y abióticos que dan lugar a procesos que regulan la oferta de servicios ecosistémicos, es este caso de aprovisionamiento, que están relacionados con el abastecimiento y uso del agua, beneficiando a comunidades en zonas rurales y urbanas, actividades económicas como la agricultura y la ganadería. Por lo tanto, según Lara et al. (2009) la estructura, funcionamiento y estado de conservación de la cuencas y sus zonas de recarga determinan el bienestar logrado en cada una de las actividades que demanda el servicio. Es importante mencionar que las comunidades dentro de los talleres participativos relacionaron la prestación de este servicio ecosistémico en zonas altas con presencia de cobertura vegetal densa y cerca a nacimientos o fuentes hídricas importantes como es el caso de la Reserva Forestal la Esmeralda.

También se evidenciaron gracias a los talleres diferentes conflictos que pueden generar una presión sobre las zonas de recarga y por ende sobre

el abastecimiento de la microcuenca Cune, como es el caso del área de conservación de la quebrada la Muralla donde se presenta un problema por el uso del suelo para la agricultura lo que ha generado que se realicen quemas para la implantación de cultivos en zonas que limitan con el área de recarga, causando una disminución en la cobertura vegetal debido a que se convierten en pequeños incendios forestales, algo similar sucede en la Reserva Forestal la Esmeralda y es que con el paso del tiempo este fragmento de bosque natural denso ha sido perturbado con diferentes grados de intervención ya que en su periferia se presentan agroecosistemas caracterizados por fincas con cultivos de café, frutales y actividad ganadera que cada vez se expanden causando la pérdida de cobertura vegetal. Otro escenario se presenta en la Quebrada la Masata donde el conflicto es causado por la delimitación de la zona potencial de recarga hídrica, es decir por la cerca que delimita el área que fue declarada como reserva de la vereda la Masata ya que impide el ingreso y uso del terreno para la ganadería generando que algunos habitantes de la comunidad derriben las cercas, causando la alteración del ecosistema. Según el Plan básico de ordenamiento Territorial del municipio de Villeta, la microcuenca cune presenta varios de los grandes problemas que confronta estas zonas estratégicas en el mundo y que se agravan cada vez más, no sólo por la falta de sensibilización y capacitación de los usuarios en los recursos naturales sino también por actividades humanas incompatibles con el uso del suelo y la acelerada expansión urbana que actúan de manera directa sobre la oferta del recurso hídrico, lo que asociado a cambios de uso del suelo, afectan los ecosistemas con graves consecuencias sobre su riqueza hidrológica y su productividad, afectando el uso sostenible de los recursos naturales renovables.

## Conclusiones

Mediante el estudio se observa que la microcuenca Cune presenta en la parte alta una reserva forestal muy importante, que permite un alto grado de captación de las precipitaciones, además su cobertura vegetal y condiciones edafológicas son factores

biofísicos apropiados para la recarga hídrica a pesar que esta zona cuenta con una pendiente alta, permitiendo que las aguas lluvias se infiltren fácilmente y recargue los acuíferos ubicados en la parte baja de la microcuenca, dando permanencia a la oferta de los servicios ecosistémicos de la zona, así mismo favoreciendo los acuíferos existentes en la parte baja de la Región.

La metodología utilizada para la identificación de las ZPRH permitió evidenciar que el conocimiento local es fundamental dentro de este tipo de investigaciones, ya que se demostró que existe una diferencia mínima entre los resultados obtenidos a través de los estudios técnicos y los resultados del análisis de la comunidad. En este orden de ideas, los estudios de la comunidad afirman los resultados de los estudios técnicos, además esta metodología brinda espacios participativos permitiendo que la comunidad formule estrategias locales para la gestión del recurso hídrico fortaleciendo la gobernanza de sus territorios, donde prevalezca el interés general para asegurar la oferta hídrica y los servicios ecosistémicos que ofrece la microcuenca Cune.

Además, los resultados obtenidos en el área de estudio permiten concluir que *las Zonas con Potencial de Recarga* alta están ubicadas dentro de los bosques densos que son áreas de conservación de la microcuenca, sin embargo, también se encuentran zonas con potencial de recarga moderada, que deben ser orientadas a la preservación del suelo y agua, ya que limitan con terrenos de uso agropecuario, generando una premura para la implementación de estrategias de conservación en la microcuenca.

## Agradecimientos

Al Centro de Desarrollo Agroindustrial y Empresarial de Villeta y al financiamiento otorgado por el Sistema de Investigación, Desarrollo Tecnológico e Innovación (SENNOVA), permitiendo dentro del marco de sus actividades incluir una participación del semillero de investigación ECOPROS.

## Referencias

Alcaldía Municipal de Villeta, 2000. Plan básico de ordenamiento territorial: PBOT Villeta 2000. Vol. 65. Villeta, Colombia.

- Bardales Espinoza, W., 2010. Metodología para la identificación de zonas de recarga hídrica naturales en las cuencas de Guatemala. PREVDA-SICA, La Libertad, El Salvador.
- Bhattacharjee, S., Saha, B., Saha, B., Uddin, M., Panna, C., Bhattacharya, P., Saha, R., 2019. Groundwater governance in Bangladesh: Established practices and recent trends. *Groundw. Sustain. Dev.* 8, 69-81. DOI: 10.1016/j.gsd.2018.02.006
- Carhuachin Gavino, R., 2014. Caracterización física y química de suelos y agua, del sector Mitapampa-Iiasam-Yingua con fines de diseño de riego tecnificado para el cultivo de alfalfa. Trabajo de grado. Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo, Huaraz, Perú.
- Chamorro Castillo, K., 2016. Identificación y caracterización de las zonas de recarga hídrica mediante herramientas SIG de los acuíferos La Carbonería, Guaraczapas, Yuyucocha y Santa Clara para la protección de las fuentes de aprovisionamiento de agua en la zona urbana de Ibarra. Trabajo de grado. Facultad de Ingeniería en Ciencias Agropecuarias y Ambientales, Universidad Técnica del Norte, Ibarra, Ecuador.
- Cifuentes, O., Mayorga, T., 2015. Estudio comparativo de la asignación del recurso hídrico para la microcuenca de la quebrada Cune mediante el uso del modelo Water Evaluation and Planning system (WEAP). Trabajo de grado. Facultad de Ingeniería, Universidad de La Salle, Bogotá, DC.
- Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca Colombia (CAR), 2009. Descripción y caracterización del medio físico subcuenca río Tobia. Informe POMCA-001-UT. Bogotá, DC.
- Fals Borda, O., 1987. Ciencia propia y colonialismo intelectual: los nuevos rumbos. 3a ed. Carlos Valencia editores, Bogotá, DE.
- Figueredo Pan, J., 2019. Metodología para determinar zonas de recarga hídrica en municipios o comunidades con recursos financieros limitados. Trabajo de grado. Facultad de Ingeniería, Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, DC.
- Flores L., H., Ruíz C., J., 1998. Estimación de la humedad del suelo para maíz de temporal mediante un balance hídrico. *Terra Latinoam.* 16(3), 219-229.
- Geilfus, F., 2002. 80 herramientas para el desarrollo participativo. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA), Santa Tecla, El Salvador.
- Giest, S., Howlett, M., 2014. Understanding the pre-conditions of commons governance: The role of network management. *Environ. Sci. Policy* 36, 37-47. DOI: 10.1016/j.envsci.2013.07.010
- Glynn, P., Plummer, L., 2005. Geochemistry and the understanding of ground-water systems. *Hydrogeol. J.* 13(1), 263-287. DOI: 10.1007/s10040-004-0429-y
- González Ñamendy, B., López Moncada, S., 2018. Caracterización de zonas potenciales de recarga hídrica en la microcuenca del río La Carreta, municipio de Cinco Pinos, Chinandega. Trabajo de grado. Universidad Nacional Agraria, Managua, Nicaragua.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales Colombia (IDEAM), 2015. Estudio nacional del agua, 2014. Bogotá, DC.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales Colombia (IDEAM), 2019. Estudio nacional del agua, 2018. Bogotá, DC.
- Instituto Nacional de Bosques Guatemala (INAB), 2015. Programa nacional de investigación forestal. Serie Técnica DT-007. Ciudad de Guatemala.
- IRENA, 2012. Estudios hidrológicos e hidrogeológicos y diseños de los sistemas de tratamiento de aguas industriales para el Túnel Lajas del Proyecto Vial Ruta del Sol Sector 1 Tramo 1. Santiago de Cali, Colombia.
- Jadeja, Y., Maheshwari, B., Packham, R., Bohra, H., Purohit, R., Thaker, B., Dillon, P., Oza, S., Dave, S., Soni, P., Dashora, Y., Dashora, R., Shah, T., Gorsiya, J., Katarra, P., Ward, J., Kookana, R., Singh, P., Chinnasamy, P., Goradiya, V., Prathapar, S., Varua, M., Chew, M., 2018. Managing aquifer recharge and sustaining groundwater use: developing a capacity building program for creating local groundwater champions. *Sustain. Water Resour. Manag.* 4(2), 317-329. DOI: 10.1007/s40899-018-0228-6
- Jarro, G., Cárdenas, A., Ortega, J., 2019. Propuestas para proteger zonas de recarga hídrica en nuestras comunidades. *Boletín.* Bogotá, DC.
- Joyce, S., Hartley, L., Applegate, D., Hoek, J., Jackson, P., 2014. Multi-scale groundwater flow modeling during temperate climate conditions for the safety assessment of the proposed high-level nuclear waste repository site at Forsmark, Sweden. *Hydrogeol. J.* 22(6), 1233-1249. DOI: 10.1007/s10040-014-1165-6
- Kendall, C., Caldwell, E., 1998. Fundamentals of isotope geochemistry. En: Kendall, C., McDonnell, J. (Eds.), *Isotope tracers in catchment hydrology.* Elsevier, Amsterdam. pp. 51-86. DOI: 10.1016/b978-0-444-81546-0.50009-4
- Lara, A., Little, C., Urrutia, R., McPhee, J., Álvarez-Garretón, C., Oyarzún, C., Soto, D., Donoso, P., Nahuelhual, L., Pino, M., Arismendi, I., 2009. Assessment of ecosystem services as an opportunity for the conservation and management of native forests in Chile. *For. Ecol. Manage.* 258(4), 415-424. DOI: 10.1016/j.foreco.2009.01.004
- León Montealegre, V., Rodríguez Rodríguez, L., 2016. Plan de ordenamiento del recurso hídrico de la microcuenca de la quebrada Cune. Trabajo de grado. Facultad de Ingeniería, Universidad de la Salle, Bogotá, DC.
- López-Corona, O., Padilla, P., Escolero, O., Armas, F., García-Arrazola, R., Esparza, R., 2013. Playing with models and optimization to overcome the tragedy of the commons in groundwater. *Complexity* 19(1), 9-21. DOI: 10.1002/cplx.21462

- Matus Silva, O., 2007. Elaboración participativa de una metodología para la identificación de zonas potenciales de recarga hídrica en subcuencas hidrográficas, aplicada a la subcuenca del río Jucuapa, Matagalpa Nicaragua. Tesis de maestría. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza Tropical (CATIE), Turrialba, Costa Rica.
- Matus, O., Faustino, J., Jiménez, F., 2008. Metodología para la identificación participativa de zonas con potencial de recarga hídrica en subcuencas hidrográficas. Validación en la subcuenca del río Jucuapa, Nicaragua. Recursos Naturales y Ambiente (55), 74-82.
- Mondal, P., Dalai, A. (Eds.), 2017. Sustainable utilization of natural resources. CRC Press, Boca Raton, FL. DOI: 10.1201/9781315153292
- Mora Jiménez, L., Ruiz Valverde, J., 2018. Determinación de áreas de recarga hídrica en las subcuencas de los ríos Frijoles y Guacalito, Upala, Costa Rica. Repertorio Científico 21(2), 23-36. DOI: 10.22458/rc.v21i2.2407
- National Groundwater Association (NGWA), 2015. Facts about global groundwater usage. Westerville, OH.
- Noriega Arriaga, J., 2005. Determinación de las áreas principales de recarga hídrica natural en la microcuenca del Río Sibacá, Chinique, Quiché. Trabajo de grado. Facultad de Agronomía, Universidad de San Carlos de Guatemala, Ciudad de Guatemala, Guatemala.
- Ortiz Caballero, L., 2014. Cálculo de la huella hídrica de los sistemas productivos agrícolas de la microcuenca Quebrada el Cune, municipio de Villeta Cundinamarca. Trabajo de grado. Facultad de Ingeniería, Universidad de La Salle, Bogotá, DC.
- Ostrom, E., 2015. Governing the commons: The evolution of institutions for collective action. Cambridge University Press, Cambridge, UK. DOI: 10.1017/CBO9781316423936
- Reyes, B., Jara, D., 2005. Gobernanza ambiental: Mensajes desde la periferia. Informe. Centro Internacional de Investigaciones para el Desarrollo (IDRC); Organización Intereclesiástica de Cooperación al Desarrollo (ICCO); Asociación Latinoamericana de Organizaciones de Promoción (ALOP), Ottawa, Canadá.
- Rucks, L., García, F., Kaplán, A., Ponce de León, J., Hill, M., 2004. Propiedades físicas del suelo. Facultad de Agronomía, Universidad de la República, Montevideo.
- Sandoval, J., Tiburan, C., 2019. Identification of potential artificial groundwater recharge sites in Mount Makiling Forest Reserve, Philippines using GIS and Analytical Hierarchy Process. Appl. Geogr. 105, 73-85. DOI: 10.1016/j.apgeog.2019.01.010
- Schosinsky, G., 2006. Mediante un balance hídrico de suelos. Rev. Geol. Amér. Central 34-35, 13-30.
- Vega Hernández, G., 2014. Modelo de asignación del recurso hídrico para la micro cuenca de la Quebrada Cune con base en el modelo de simulación Water Evaluation and Plannign System (WEAP). Trabajo de grado. Facultad de Ingeniería, Universidad de la Salle, Bogotá, DC.
- Vélez Otálvaro, M., Vásquez Ariza, L., 2004. Métodos para determinar la recarga en acuíferos. Av. Recur. Hidraul. (11), 51-62.
- Watto, A., 2015. The economics of groundwater irrigation in the Indus Basin, Pakistan: Tube-well adoption, technical and irrigation water efficiency and optimal allocation. Tesis de doctorado. The University of Western Australia, Western Australia, Australia.