

**Aplicación de los Sistemas de Información Geográfica en la identificación del potencial de
recarga hídrica de la microcuenca Río Botello**

Yesica Paola Pérez Pardo

Universidad de Antonio Nariño

Especialización en Sistemas de información Geográfica

Bogotá, Colombia

2021

**Aplicación de los Sistemas de Información Geográfica en la identificación del potencial de
recarga hídrica de la microcuenca Rio Botello**

Yesica Paola Pérez Pardo

Director

Andrés Felipe Carvajal Vanegas

Trabajo final presentado como requisito para optar al título de:

Especialista en Sistemas de Información Geográfica

Universidad de Antonio Nariño

Especialización en Sistemas de información Geográfica

Bogotá, Colombia

2021

TABLA DE CONTENIDO

1	Resumen.....	1
2	Introducción.....	2
3	Objetivos.....	5
3.1	Objetivo general.....	5
3.2	Objetivos específicos.....	5
4	Marco teórico y estado del conocimiento.....	6
4.1	Marco teórico.....	6
4.2	Estado del conocimiento.....	11
5	Metodología.....	16
5.1	Descripción del área de estudio.....	16
5.1.1	Localización del área de estudio dentro de la zonificación hidrográfica nacional .	17
5.2	Descripción del proceso metodológico.....	19
6	Resultados y discusión.....	25
6.1	Variables de ponderación.....	25
6.1.1	Relieve y pendiente.....	25
6.1.2	Tipo de suelo.....	27
6.1.3	Tipo de roca.....	29
6.1.4	Cobertura Vegetal.....	30

6.1.5	Uso del suelo.....	33
6.2	Potencial de recarga hídrica para el área de estudio.....	35
7	Conclusiones.....	39
8	Recomendaciones	40
9	Referencias.....	41

Lista de figuras

Figura 1 Diagrama esquemático de una cuenca que muestra los componentes del balance hídrico y las variables potencialmente relacionadas con la recarga de las aguas subterráneas.	8
Figura 2 Localización de la cuenca Río Botello.	16
Figura 3 Sistema de codificación de cuencas.	18
Figura 4 Localización hidrográfica de la cuenca Río Botello.....	18
Figura 5 Imagen Landsat.	20
Figura 6 Combinaciones de banda de la imagen satelital.	21
Figura 7 Caracterización de los elementos biofísicos en función a la posibilidad de recarga hídrica.	23
<i>Figura 7. Mapa de ponderación de pendientes y micro relieve.</i>	<i>26</i>
<i>Figura 8. Mapa de ponderación de tipo de suelo.</i>	<i>27</i>
<i>Figura 9. Mapa de ponderación según el tipo de roca.....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 10. Mapa de ponderación según porcentaje de cobertura vegetal.....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 11. Mapa de ponderación según uso de suelo.</i>	<i>33</i>
<i>Figura 12. Mapa de zonas con potencial de recarga hídrica.....</i>	<i>35</i>

Lista de tablas

Tabla.1 Interpretación de los valores de potencial de recarga hídrica.	24
Tabla.2 Área (ha) y porcentaje según pendiente y micro relieve.	27
Tabla.3 Área (ha) y porcentaje según su textura.....	28
Tabla.4 Área (ha) y porcentaje según su geología.....	30
Tabla.5 Área (ha) y porcentaje según su cobertura vegetal.	32
Tabla.6 Área (ha) y porcentaje según su tipo de suelo.	34
Tabla.7 Área (ha) y porcentaje de potencial de recarga hídrica.	37

1 Resumen

La problemática mundial debido a la sobreexplotación de fuentes naturales del recurso hídrico, fundamentales para satisfacer necesidades básicas de comunidades en donde el agua subterránea es su única fuente o es alternativa de abastecimiento en temporadas de sequía, han incrementado la importancia de la identificación de las zonas que favorecen el proceso de recarga hídrica subterránea (Sasidharan et al., 2020), de manera que se puedan adelantar procesos de gestión eficiente y conservación de estos sitios estratégicos para el mantenimiento y mitigación del impacto sobre el recurso. Debido a lo anterior, se planteó esta investigación con el fin de determinar el potencial de recarga hídrica dentro de la microcuenca río Botello en el municipio de Facatativá Cundinamarca, a través de un proceso de superposición de capas para la ponderación de variables como: la pendiente, el tipo de suelo, la geología, el uso del suelo y la cobertura vegetal. El desarrollo de la investigación permitió determinar que el 74,76% del área de la microcuenca del Río Botello presenta un potencial moderado para la recarga hídrica y un 20,90% de potencial muy bajo; los resultados reflejan principalmente que las áreas de bosques que se conservan en la parte alta de la cuenca y a las condiciones de relieve, son los principales factores que favorecen el proceso de infiltración de agua en el suelo del área de estudio. Adicional a lo anterior, quedó en evidencia la influencia de las actividades antrópicas en la alteración del potencial de recarga hídrica, debido a que se observa que los procesos de expansión de la frontera agrícola y de urbanización, que han ocasionado la reducción de cobertura natural y cambio en el uso del suelo, son factores determinantes en la reducción del potencial de recarga hídrica en la microcuenca. Lo cual resalta la importancia de la planificación e implementación de estrategias para la adecuada gestión y manejo del recurso hídrico, dentro de la cuenca del Río Botello, como fuente esencial de abastecimiento del recurso principalmente para la comunidad del municipio de Facatativá.

2 Introducción

La demanda de agua a nivel mundial ha presentado un aumento exponencial, lo cual influye severamente en el incremento del estrés de las fuentes de hídricas tanto superficiales como subterráneas, (Abijith et al., 2020). Factores como el aumento de la población, el estilo de vida insostenible que se ha evidenciado en los últimos tiempos, generan procesos acelerados como la rápida expansión urbana, el cual es una de las principales causas del agotamiento y la contaminación del recurso hídrico subterráneo en el planeta (Andrade & Guru, 2020; Malik & Shukla, 2019), seguido de factores como la agricultura intensiva que ocasiona su sobreexplotación y las irregulares o limitadas precipitaciones (Chatterjee et al., 2020; Guo et al., 2019) amenazando la seguridad del recurso, situación que se puede evidenciar con que más de 2 millones de personas viven en países con alto estrés hídrico y con el 30 % de los sistemas de aguas subterráneas más grandes del mundo sobreexplotados (Wiebe & Rudolph, 2020); como consecuencia, este aumento en la presión sobre el recurso será aún más grave en el futuro para países desarrollados y en vía de desarrollo (Gebru & Tesfahunegn, 2020).

Considerando la disminución gradual de los recursos hídricos, el aumento de la demanda de agua y mala gestión del recurso, se genera la necesidad de cambiar este panorama para realizar una gestión de manera más eficiente (L. K. Singh et al., 2017). Por lo tanto, las actividades que sean encaminadas a este objetivo se convierten en un aspecto fundamental dentro de las estrategias de gestión del recurso hídrico a nivel global, y puntualmente, en regiones en donde el agua subterránea es el único recurso, lo cual, es a su vez una limitante en el desarrollo económico y global de dichas regiones (Ghayoumian et al., 2007).

Por otro lado, si bien en los últimos años ha habido avances significativos en la comprensión de los cambios en la hidrología superficial durante y después de la conversión de la tierra para la

urbanización, hasta la fecha, los efectos sobre la hidrología subterránea, particularmente la recarga de aguas subterráneas, son poco conocidos (Hall et al., 2020), se debe tener en cuenta además, que las fuentes de agua subterránea juegan un papel importante, como suministros de agua y fuente del recurso durante los periodos de escasas precipitaciones (Peng et al., 2014) lo cual combinado con la variabilidad climática se traduce en la sobreexplotación de los acuíferos en todo el mundo (Mautner et al., 2020). La identificación y comprensión de las zonas con potencial de recarga, así como la estimación de sus patrones espaciales y temporales juegan un papel importante en la gestión sostenible de los recursos hídricos subterráneos (Ashaolu, 2020).

Para el caso de estudio, en la microcuenca río Botello, se conoce que debido a procesos acelerados de expansión de la frontera agrícola, la disponibilidad del recurso hídrico en su área aferente se ha visto ampliamente afectada (Vega, 2011), razón por la cual, identificar el potencial de recarga y las áreas críticas para conservación se considera fundamental.

Debido a lo anterior, se propone realizar esta investigación que tiene como propósito principal, identificar y evaluar las zonas con potencial de recarga hídrica subterránea en la microcuenca del río Botello, a través de la implementación del modelo propuesto por Matus et al. (2009) en su Guía para la identificación participativa de zonas de recarga hídrica, que involucra la superposición de variables en un entorno SIG, para componentes como la pendiente y el microrelieve, el tipo de suelo, la cobertura, el tipo de roca y el uso del suelo del área a evaluar.

El modelo se plantea a partir de la ponderación de variables, en donde la pendiente, el tipo de suelo y la cobertura vegetal, se representan como las variables con mayor relevancia, teniendo en cuenta que sus características definen la capacidad y el desarrollo del proceso de infiltración del agua en el suelo hacia los acuíferos subterráneos.

La comprensión del potencial de recarga hídrica de esta zona, se hace necesaria como un factor fundamental para la gestión sostenible del recurso hídrico, es ahí donde comprender y caracterizar la recarga requiere una evaluación cuantitativa precisa de múltiples parámetros basándose en una combinación de principios científicos y técnicas analíticas geoespaciales modernas (Lentswe & Molwalefhe, 2020).

3 Objetivos

3.1 Objetivo general

Evaluar el potencial de recarga hídrica a través del uso de análisis espacial, de la microcuenca Río Botello en el municipio de Facatativá.

3.2 Objetivos específicos

- Establecer las principales variables dentro de la definición de zonas de recarga hídrica en el área de estudio.
- Caracterizar las zonas con mayor potencial de recarga hídrica natural dentro de la cuenca Río Botello.

4 Marco teórico y estado del conocimiento

4.1 Marco teórico

Para el desarrollo de la investigación, es necesario el conocimiento de conceptos importantes que tienen relación con el objeto de estudio, las zonas de recarga hídrica. En primera instancia, se define, el término recarga de agua, este hace referencia a la entrada de agua desde la zona no saturada a la zona saturada, debajo de la superficie del nivel freático, junto con el flujo asociado fuera de la capa freática de la zona saturada (Batelaan & De Smedt, 2007), este proceso ocurre solamente, cuando el agua fluye debajo del suelo y se infiltra en la zona saturada, (S. K. Singh et al., 2019; Yeh et al., 2016), El agua que se infiltra en el suelo, es absorbida por las plantas, que luego la devuelven a la atmosfera por evapotranspiración, otra parte se filtra hacia abajo, debajo de la zona de la raíz para alcanzar la zona saturada, lo que se agrega al almacenamiento de agua subterránea como recarga (Lentswe & Molwalefhe, 2020). Este proceso se produce a partir de diferentes fuentes como la infiltración de agua lluvia, interacción con fuentes superficiales y con otros acuíferos, y el flujo a través de superficies de contacto entre el acuífero, el basamento y las unidades de encaje (CORANTIOQUIA, 2002).

Es uno de los componentes menos entendidos dentro del ciclo hidrológico, porque varía ampliamente en el espacio y en el tiempo, y sus tasas de medición son difíciles de valorar directamente. Lo anterior teniendo en cuenta que, cuando la precipitación alcanza la superficie del suelo, puede fluir cuesta abajo en forma de escorrentía, mientras que otro porcentaje puede infiltrarse y ser absorbido por el suelo (Lentswe & Molwalefhe, 2020).

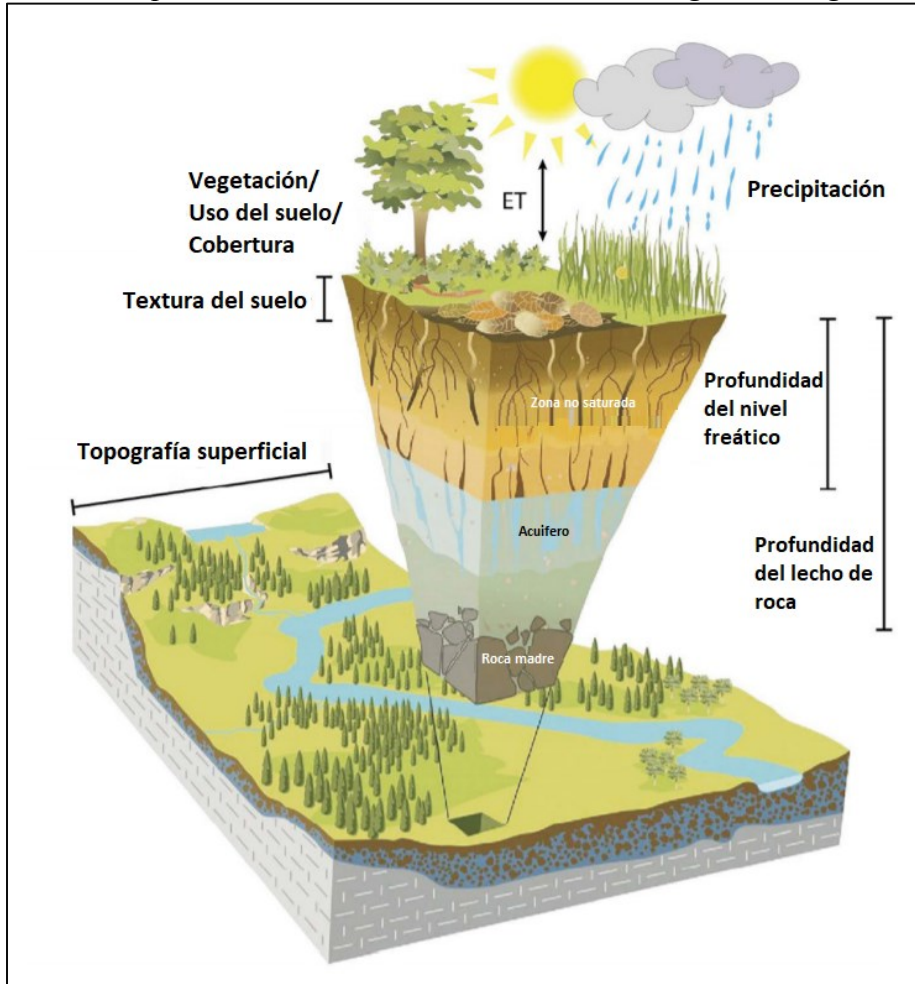
La comprensión y caracterización de este proceso requiere una evaluación cuantitativa precisa de múltiples parámetros basándose en una combinación de principios científicos y técnicas analíticas (Lentswe & Molwalefhe, 2020), para lo cual, una de las mejores herramientas empleadas por

especialistas, es la teledetección (Andrade & Guru, 2020), esta, permite recuperar información espacio-temporal en áreas vastas o físicamente inaccesibles, información que se gestiona y analiza eficazmente mediante diversas metodologías de la información geográfica, que compensa la precisión con la disponibilidad de la información (Fathi et al., 2020).

Por otro lado, se definen las zonas de recarga hídrica, como aquellas áreas en las cuales se lleva a cabo el proceso de infiltración o flujo de agua del suelo hacia abajo, que es dinámico y varía con la profundidad, el clima y otras variables de entrada como el relieve, la cobertura y el uso de suelo (Altafi Dadgar et al., 2020), estas zonas son sitios donde la capacidad de infiltración es alta y pueden estar cercanas o no de donde son empleados dichos acuíferos. Las zonas de importancia para identificación son aquellas que por sus características facilitan la infiltración, ofreciendo mayores aportes de recarga, y a su vez las zonas que pueden ser susceptibles a disminuir su potencial de recarga al ser sometidas a un manejo diferente al de su capacidad, estas últimas denominadas como zonas críticas de recarga hídrica (Matus et al., 2009).

La recarga depende del régimen de precipitación, la escorrentía superficial, el caudal, la permeabilidad de los suelos, el contenido de humedad del suelos, así como también de la pendiente de la superficie, entre otras variables. En la Figura 1 se presenta el diagrama esquemático de los componentes del balance hídrico y las variables potencialmente relacionadas con la recarga de las aguas subterráneas (Moeck et al., 2020).

Figura 1 Diagrama esquemático de una cuenca que muestra los componentes del balance hídrico y las variables potencialmente relacionadas con la recarga de las aguas subterráneas.



Fuente: Adaptada de (Moeck et al., 2020).

Queda en evidencia que, los factores que influyen en mayor medida en el proceso de recarga son, la pendiente del terreno, la textura del suelo y la cobertura. La pendiente de la superficie constituye un factor importante, puesto que dependiendo de la inclinación que posea, varía el tiempo de contacto entre el terreno y el agua (Donis, 2015), por lo tanto, en áreas con poca pendiente, se incrementa el tiempo de contacto favoreciendo la infiltración y por consiguiente la recarga (Coy, 2015). A su vez, la textura del suelo influye de tal manera que, según Custodio, E y Llamas Mr, en 2001, en cuanto menor sea la porción de finos (existencia de poros grandes) se reduce la tensión

capilar y favorece directamente la entrada de agua (Bardales Espinoza, 2010). Por su parte, la presencia de cobertura natural en suelo, disminuye la escorrentía superficial, lo cual facilita el proceso de infiltración aumentando el tiempo de contacto del agua con la superficie (Chávez-Gómez et al., 2017).

Adicional a lo anterior, se define el término cuenca hidrográfica, siendo la unidad de análisis de la presente investigación. El dónde, según el artículo 3 del Decreto 1640 de 2012, una cuenca hidrográfica corresponde al “*el área de aguas superficiales o subterráneas que vierten a una red hidrográfica natural con uno o varios cauces naturales, de caudal continuo o intermitente, que confluyen en un curso mayor que, a su vez, puede desembocar en un río principal, en un depósito natural de aguas, en un pantano o directamente en el mar*”. Es la unidad adecuada para la planificación ambiental del territorio, teniendo en cuenta que al involucrar elementos tanto espaciales como sociales, permiten la comprensión integral de la realidad del territorio, a su vez, a lo largo del tiempo sus límites fisiográficos se mantienen de mejor manera que otras unidades de análisis (Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo, 2014).

Finalmente, queda en evidencia la importancia del conocimiento y manejo de estos conceptos, y la relevancia que toma el desarrollo de investigaciones en este campo, ya que el agua subterránea se está convirtiendo en la principal fuente de agua limpia y de riego para la mayoría de las comunidades rurales y urbanas, y el comprender el comportamiento del recurso es necesario para garantizar el desarrollo de una región, ya que esto proporciona información cualitativa sobre la disponibilidad y potencial del agua (Gebru & Tesfahunegn, 2020).

Con la identificación de su variabilidad y distribución espacial, se obtiene una herramienta clave para la gestión de las aguas subterráneas, especialmente, en regiones áridas (Mokadem et al., 2018). Con este propósito, se define además, el uso de metodologías de la información geográfica.

como alternativas rápidas y rentables para cumplir el objetivo de identificar factores relevantes en los procesos de recarga (Machiwal & Jha, 2015; S. K. Singh et al., 2019), ya que, permiten la definición y el mapeo de áreas con potencial de recarga hídrica, los cuales son útiles para la planificación e implementación de pozos y /o estructuras hidráulicas para el abastecimiento del recurso en una región (Arshad et al., 2020). Empleando métodos basados en SIG, la información derivada de exploraciones geológicas y geomorfológicas, características de superficie, entre otras, se puede evaluar de manera íntegra la distribución de las zonas de recarga en diferentes regiones (Mokadem et al., 2018).

4.2 Estado del conocimiento

El desconocimiento del funcionamiento del sistema de recarga de un acuífero impide la implementación de medidas de gestión e intervención en áreas con alto estrés hídrico por déficit del recurso (Daesslé et al., 2020). Por lo tanto, la identificación de las zonas con alto potencial de recarga son herramientas fundamentales para la adecuada gestión de acuíferos, de manera que se evite la alteración o contaminación del recurso, y a su vez reducir el déficit de suministro de agua (Fathi et al., 2020).

Su estimación sigue siendo un desafío en el campo de la hidrología, debido a su naturaleza no lineal, que varía en el espacio y en el tiempo (Sasidharan et al., 2020). Por lo anterior, diversas investigaciones se han desarrollado a nivel nacional e internacional con el propósito de definir una metodología para la estimación e identificación de zonas de recarga hídrica aplicado a casos de estudio.

Con base en lo anterior, avances recientes en el procesamiento de imágenes satelitales combinados con el análisis multicriterio del entorno geoespacial, han permitido identificar mejor las áreas donde se produce recarga de forma natural, utilizando combinaciones de datos como geología, topografía, vegetación, características del suelo, por mencionar unos pocos (Lentswe & Molwalefhe, 2020).

Enfoques de modelación con Sistemas de información Geográfica (SIG) para evaluar la vulnerabilidad de zonas de recarga hídrica subterránea en países como India, empleando el modelo DRASTIC basado en SIG, con variables de entrada como el tipo de suelo, topografía y conductividad hidráulica en partes del área de captación del río Tawa, permitieron establecer que el 34,84% del área es una zona de alta vulnerabilidad por contaminación de agua subterránea (Malik & Shukla, 2019). En Irán, emplearon lógica booleana y difusa en un entorno SIG para

determinar sitios estratégicos de recarga artificial de agua subterránea, en el cual se evidenció la estrecha relación entre la geomorfología de un área y su aptitud como zona de recarga hídrica, además, se estimó que las áreas más apropiadas corresponden a las geoformas de abanicos aluviales (Ghayoumian et al., 2007), estas geoformas al igual que los cuerpos de agua superficiales, son zonas que contribuyen significativamente a la recarga de agua; tal como lo evidenció el estudio realizado para determinar el rendimiento específico regional y recarga natural, mediante el uso de la técnica de fluctuación doble del nivel freático (DWT por sus siglas en Inglés) y SIG en regiones rocosas, de difícil acceso e información limitada, en un área en la parte sur de Rajasthan en India (Machiwal & Jha, 2015). Por otro lado, científicos Belgas desarrollaron un metodología basada en SIG, que consiste en un modelo de balance de agua distribuido espacialmente, para simular la recarga promedio de un área de estudio, con variables dependientes del tipo de suelo, la cobertura, topografía y parámetros hidrometeorológicos, simulando la recarga de manera iterativa, demostrando además, que la estimación de la recarga también es influenciada por la profundidad del nivel freático, asimismo, se evidenció que en áreas con poca profundidad de nivel de agua subterránea por ejemplo en valles, se generan condiciones que favorecen a la recarga negativa, como resultado de procesos de evapotranspiración por abundante vegetación freatofita (Batelaan & De Smedt, 2007).

En Nueva Zelanda, a partir de un enfoque SIG para mapear zonas de posible recarga hídrica subterránea, se determinó el bajo potencial de recarga que tienen zonas urbanas y montañosas, como en los Alpes del Sur, mientras que se evidenció un potencial más alto en regiones con grandes lagos y en áreas con llanuras de menor elevación, en donde prevalecen los sedimentos cuaternarios, se identificaron variables de entrada esenciales para el mapeo, como lo son la pendiente, el uso del suelo, densidad y red de drenaje que superpuestos derivan en zonas potenciales de recarga para

aguas subterráneas (S. K. Singh et al., 2019). En Pakistán, a través del software ArcGIS, se realizó un análisis de superposición de capas temáticas, mediante la aplicación de pesos y valores de clasificación por subclase, además, se propuso una metodología para definir zonas favorables de recarga potencial de agua subterránea (FPRI), integrando el índice de recarga potencial (FRI) con el índice de vulnerabilidad de agua (VI) basado en DRASTIC, ambos se normalización y modificaron empleando un proceso jerárquico analítico (AHP) y un modelo de frecuencia respectivamente, con esta metodología se concluyó que en el 53% del área evaluada, en una región agro-urbana, la recarga es de muy baja a baja, el 22% es moderada y finalmente, el 25% del área evaluada tiene potencial alto como zona de recarga (Arshad et al., 2020).

En Guatemala, se empleó un modelo metodológico basado en SIG, con el fin de determinar las zonas potenciales de recarga hídrica en dos subcuencas hidrográficas, las cuales incluyen a los ríos Shusho y Sasmó en el municipio de Chiquimula, las variables o capas temáticas de entrada fueron: la pendiente, geología velocidad de infiltración, cobertura vegetal, uso del suelo y textura del suelo; los resultados permitieron establecer las medidas y planes de manejo en áreas con potencial de recarga alto, principalmente establecidas sobre áreas de cobertura de bosques, en donde los programas de protección e incentivos para la reforestación pueden ser alternativas viables a considerar, se destaca que es importante la réplica de esta clase de metodologías de superposición en diferentes zonas, con el fin de obtener información sobre la precisión y exactitud del método y la confianza en los resultados (Bueso Campos, 2010). Para la subcuenca del río Jucupa en el departamento de Matagalpa - Nicaragua, se elaboró una propuesta metodológica para identificar zonas potenciales de recarga hídrica, que combina conocimientos técnicos y científicos, con los conocimientos locales de la comunidad, dentro de la metodología de mapeo, se consideró el uso de unidades como la pendiente, el tipo de suelo, el uso, la cobertura vegetal y la geología de la

subcuenca. Con el uso de esta metodología en conjunto, con la identificación realizada con los conocimientos locales, se pudo observar que, no existen diferencias significativas entre la opinión de los actores comunitarios, técnicos y especialistas con relación a los criterios necesarios para la identificación de estas zonas potenciales de recarga, permitiendo la integración de estos conocimientos, a su vez, se determina que hay bastante similitud entre los resultados obtenidos con el métodos RAS y con y los resultados obtenidos con la implementación del modelo propuesto (Matus, 2007).

Finalmente, es importante resaltar que existen diversos métodos para realizar la estimación de la recarga hídrica, varios de ellos clasificados según la procedencia de la información a utilizar, así como por la técnica empleada para su estimación (Vélez Otálvaro & Vásquez Ariza, 2004).

Según Figueredo en el 2019, algunas de las metodologías empleadas para la identificación de las zonas de recarga hídrica de aguas subterráneas son: El métodos RAS, elaborado Forges (2005), el cual se basa en calcular el agua que se infiltra en el subsuelo, basado en los principios de Schosinsky y Losilla (2000), este requiere de coeficientes para calcular la infiltración, los cuales se multiplican por un coeficiente climático basado en un balance hídrico de la zona (Matus, 2007). La metodología con base en el balance de agua, la cual se concentra en aplicar el principio de conservación de masa en una región de volumen conocido, definida por condiciones de frontera, durante un lapso dado; por otro lado, se puede encontrar la metodología de trazadores, los cuales son sustancias que pueden identificarse visual o analíticamente, que entre sus amplios usos se encuentra, la determinación de mecanismos responsables del flujo del agua, identificación de sistemas de contaminación, facilitan calcular el ciclo biológico de los nutrientes de un ecosistema, y determinar fuentes de recarga hídrica. También menciona el método participativo, basado en el análisis de superposición y evaluación práctica en campo de cinco elementos primordiales que

son: la pendiente, el tipo de suelo, tipo de roca, cobertura vegetal y uso del suelo; este método es ampliamente usado gracias a practicidad, fácil aplicación y combinación de conocimientos científicos, técnicos y locales (Figueredo, 2019).

Según lo anterior, factores como la geología, litología, pendiente, patrón de drenaje, forma del terreno, uso del suelo, cobertura y clima influyen en la ocurrencia y el movimiento del agua subterránea, por lo cual es necesario considerar estos factores para la definición del potencial de recarga en un área (S. K. Singh et al., 2019; Yeh et al., 2016).

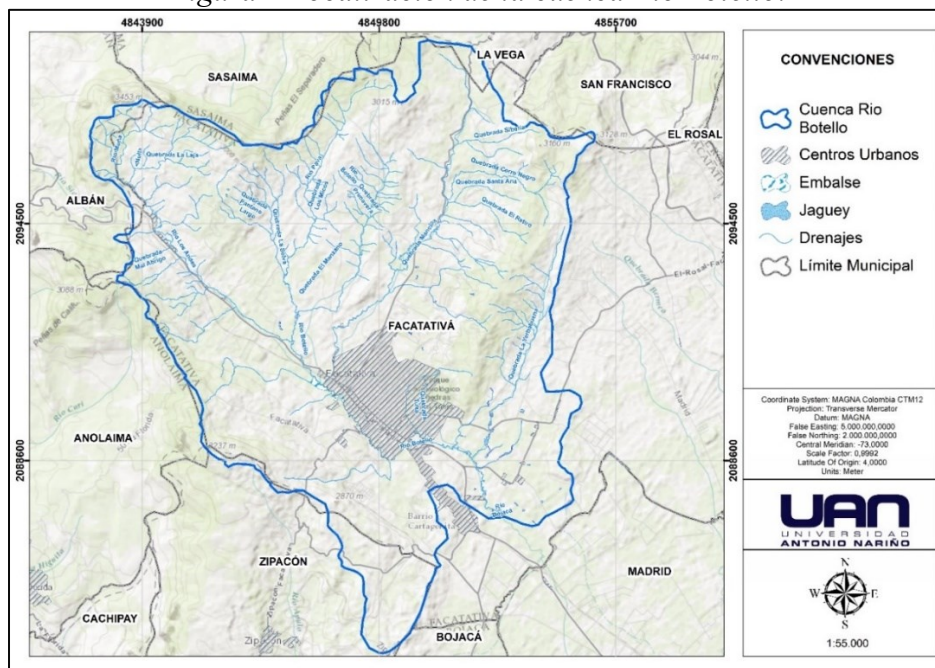
5 Metodología

5.1 Descripción del área de estudio

El área de estudio se enmarca en la microcuenca del río Botello, el cual es fuente principal de abastecimiento del recurso hídrico en el municipio de Facatativá Cundinamarca, nace en el Cerro Peñas del Aserradero y realiza un recorrido de 25 km aproximadamente, en el cual sus aguas confluyen con el río Subachoque y son recibidas aguas abajo por el río Balsillas, para pasar a ser tributario del río Bogotá (Vega, 2011). A lo largo de su recorrido pasa por el casco urbano del municipio de Facatativá, punto en el cual es conocido por la comunidad como río Botello, dentro de su área aferente, se encuentran los afluentes principales conocidos como la quebrada San Rafael, quebrada El Vino, quebrada Pozo de la Mirta, río de la Pava entre otras (Henao, 2014).

Esta cuenca tiene un área total de 10.829 ha, el mayor porcentaje de área aferente se encuentra dentro de Facatativá (Figura 2), ya que abarca el 70% del área urbana del municipio (Rodríguez & Pérez, 2019).

Figura 2 Localización de la cuenca Río Botello.



Fuente: Autor, 2020.

La microcuenca hace parte de la zona media-baja de la subcuenca del río Balsillas, la cual se localiza en la parte centro occidental de la cuenca del río Bogotá, en el sector meridional de la Provincia Fisiográfica de la Cordillera Oriental; administrativamente pertenece a la Provincia de Gualivá con los municipios de Albán, Sasaima, San Francisco y La Vega; la Provincia del Tequendama con el municipio de Anolaima; la Provincia de Sabana Occidente con los municipios de Bojacá, El Rosal, Facatativá, Funza, Madrid, Mosquera, Subachoque y Zipacón; la Provincia de Río Negro con el municipio de Pacho; la Provincia de Sabana Centro con los municipios de Tenjo, Tabio y Zipaquirá y la Provincia de Soacha con este mismo municipio (Ecoforest, 2006).

5.1.1 Localización del área de estudio dentro de la zonificación hidrográfica nacional

El Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, en el año 2012 mediante el Decreto 1640, estableció una estructura para la planificación, ordenación y manejo de unidades hidrológicas de análisis y acuíferos, estableciendo la siguiente estructura hidrográfica en el país:

- Áreas Hidrográficas o Macrocuencas
- Zonas Hidrográficas
- Subzonas Hidrográficas o su nivel subsiguiente
- Microcuencas y Acuíferos.

Más tarde, el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), presentó el sistema de codificación de unidades hidrológicas de análisis (IDEAM, 2013), conformado por un consecutivo numérico compuesto por 10 dígitos (Figura 4).

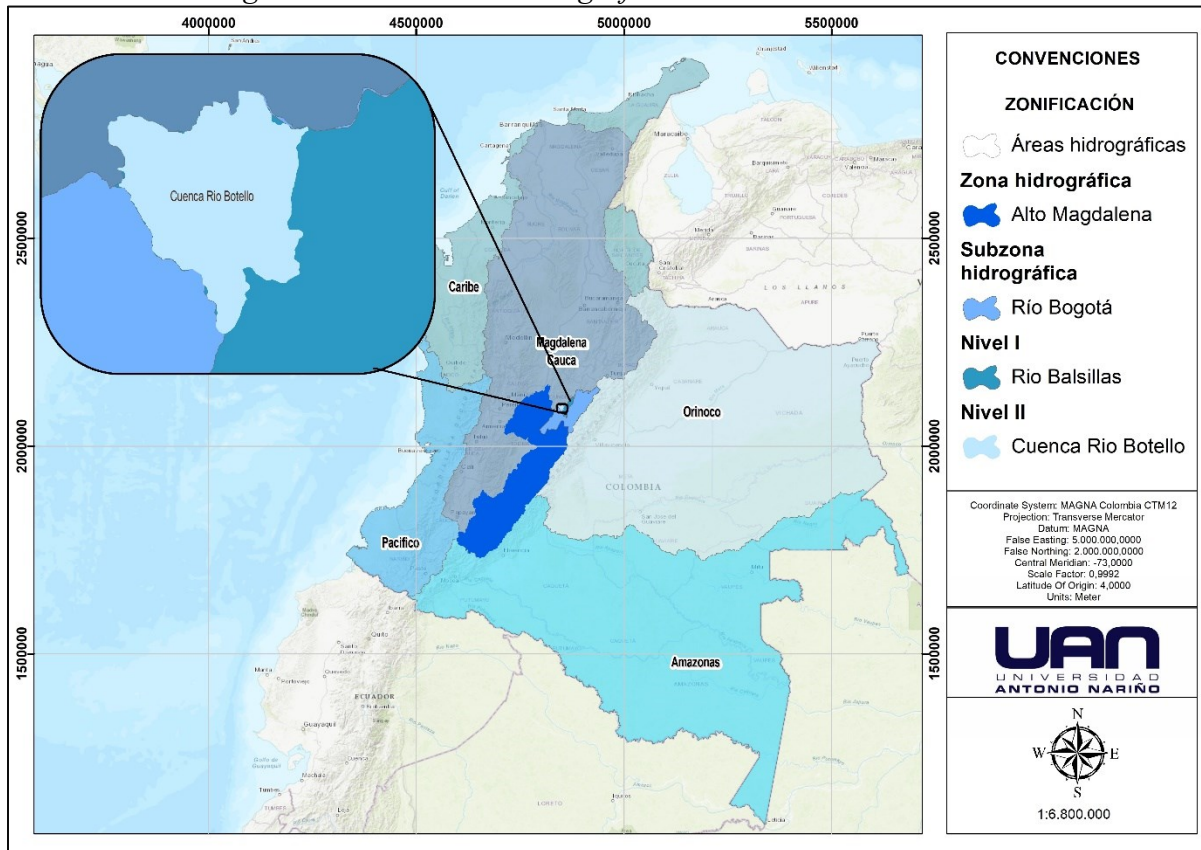
Figura 3 Sistema de codificación de cuencas.



Fuente: (IDEAM, 2013).

De acuerdo con esta clasificación, el área de estudio se encuentra localizada en el Área hidrográfica Magdalena Cauca (02), Zona hidrográfica Alto Magdalena (21), Subzona Hidrográfica Río Bogotá (2120), nivel I Río Balsillas (2120-08) (Figura 4).

Figura 4 Localización hidrográfica de la cuenca Río Botello.



Fuente: Autor, 2020.

5.2 Descripción del proceso metodológico

Con base en los resultados de la consulta de información, se determinó que el modelo propuesto por Matus et al. 2009 reúne las consideraciones más relevantes tenidas en cuenta en los casos de estudio consultados, en los cuales se emplea un entorno SIG para la superposición de capas temáticas y ponderación de variables para así identificar las zonas potenciales para la recarga hídrica.

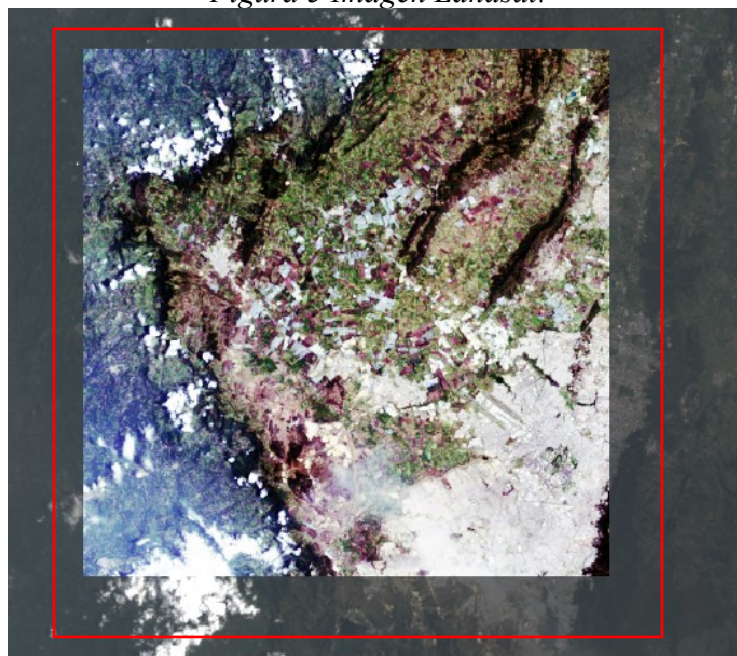
Con este modelo como base, el desarrollo de la investigación se divide en las siguientes etapas:

Etapa I: Adquisición de información necesaria como los mapas de suelo a nivel nacional y departamental que suministran información importante acerca del recurso; a través de la descripción e interpretación de su génesis, características físicas, químicas, mineralógicas, morfológicas, taxonomía y distribución, como base para la determinación de sus potencialidades y limitaciones de uso, al igual que cartografía base escala 1: 25.0000 disponibles en el Geoportal de datos abiertos de Instituto Geográfico Agustín Codazzi- IGAC, además, el mapa geológico a nivel nacional y a nivel Cundinamarca, disponibles en el Geoportal del Servicio Geológico Colombiano, cabe aclarar que, debido a la ausencia de información detallada para el área de estudio, se empleó información escala 1:100.000, lo cual disminuye el nivel de detalle del análisis a realizar. Por otro lado, apoyado en un modelo de elevación digital correspondiente a la misión Alos Palsar (Modelo Digital de Terreno con resolución de 12.5 metros¹), se generó el mapa de pendientes de la zona, y finalmente, partiendo de la interpretación de imágenes satelitales del área obtenidas del portal USGS (<https://earthexplorer.usgs.gov/>) se obtuvo la imagen correspondiente a la fecha 2020-03-22, obtenida del sensor LANDSAT 8, compuesta por 11 bandas en total con

¹ Conjunto de datos: © JAXA / METI ALOS PALSAR L1.0 2007. Acceso a través de ASF DAAC. <https://search.asf.alaska.edu/#/>

una resolución espacial de 30 m y 15 m para el caso de la banda 8 que es la Pancromática, la cual empleó para mejorar la resolución de la imagen una vez realizada la composición de bandas. La imagen LANDSAT se seleccionó por su uso extendido en el monitoreo de la vegetación, para aplicaciones geológicas y para el estudio de los recursos naturales; dado que las bandas que contienen pueden combinarse produciendo una gama de imágenes de color que incrementan notablemente sus aplicaciones (Figura 5).

Figura 5 Imagen Landsat.



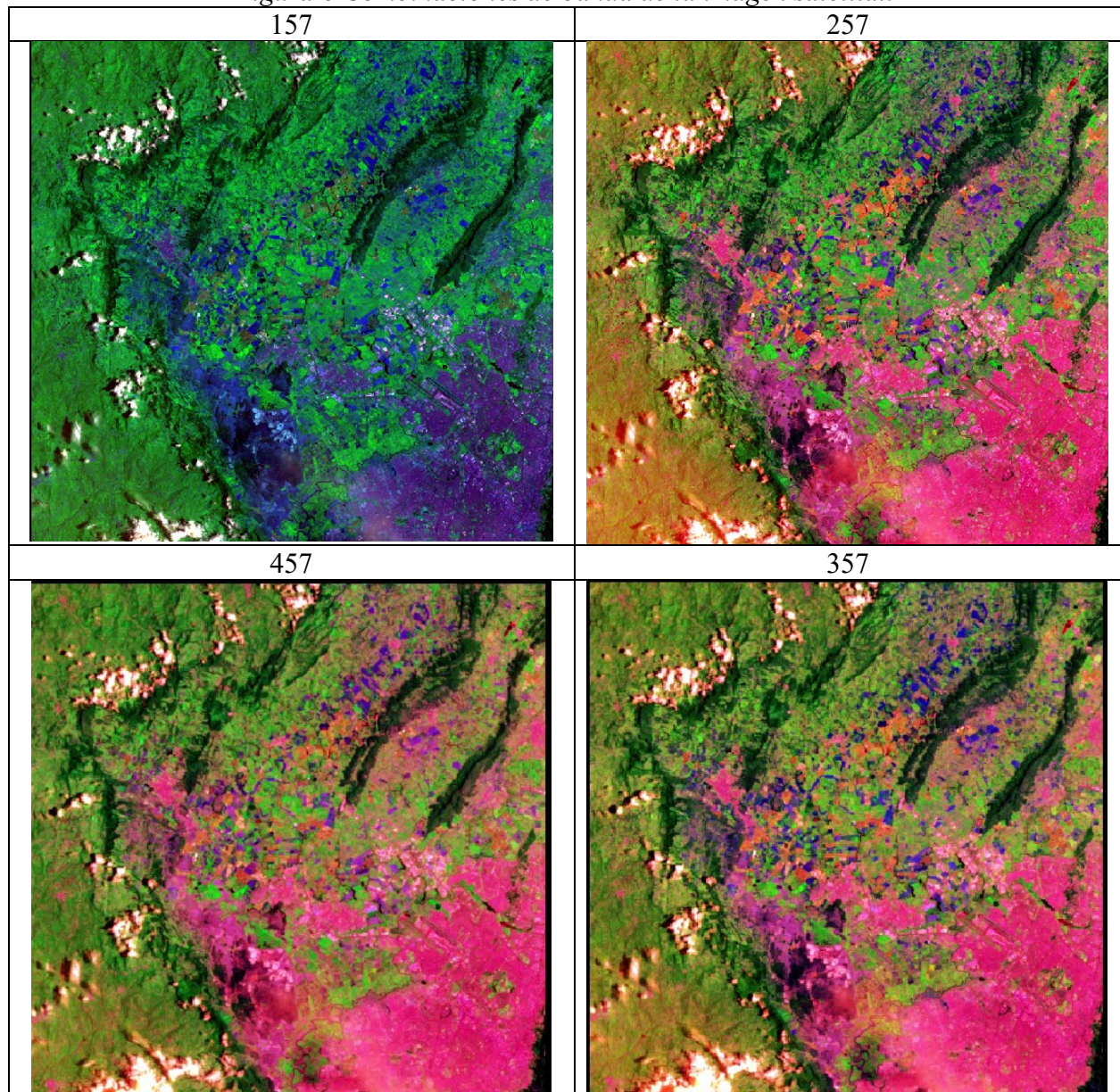
Fuente: Adaptado de USGS, 2020².

Teniendo como insumo la imagen satelital, se realizó un análisis estadístico de la imagen (unibanda y multibanda) con el fin de determinar la correlación entre las diferentes combinaciones de banda que conforman la imagen, de manera que facilitaran la identificación e interpretación de las coberturas en el área de estudio. Los resultados obtenidos para el factor de índice óptimo (OIF) empleando la matrices de Covarianza y Correlación de la herramienta “Model Maker” del software Erdas, permitieron establecer que los OIF más altos de la imagen seleccionada son coherentes con

² USGS, 2020. <https://earthexplorer.usgs.gov/>

la literatura, en donde se resaltan combinaciones de bandas como la 157, 257, 145 (Figura 6) para clasificación de coberturas, ya que la banda cinco correspondiente al infrarrojo cercano provee información de coberturas como vegetación gracias a su buena sensibilidad.

Figura 6 Combinaciones de banda de la imagen satelital.



Fuente: Autor, 2020.

Por otro lado, fue necesario realizar una serie de correcciones a las imágenes satelitales previo al análisis de estas, con el fin de eliminar distorsiones que se generan principalmente debido a problemas ocurridos en el proceso de transmisión de la información o de los mismos sensores de detección. Razón por la cual se propone la implementación de software como Erdas y ArcGIS para llevar a cabo la corrección atmosférica de una imagen, que es el proceso mediante el cual se elimina el efecto de aerosoles y la radiancia que se introduce en el sensor y se ve reflejado en la imagen, como producto de la interacción de la atmósfera, con este proceso se logra mejorar la calidad visual de la imagen como de eliminar el ruido generado por la atmósfera, para así mejorar los resultados de la clasificación no supervisada y la percepción remota (Aguilar Arias et al., 2015).

Finalmente, se realizó la clasificación supervisada mediante el software Erdas, como elemento esencial para la extracción de información cuantitativa de una imagen satelital; es una herramienta de modelado empírica o basado en datos en la cual el proceso deriva relaciones estadísticas entre las variables de entrada y los datos de campo, por lo que es un método que parte de cierto nivel de conocimiento de la zona de estudio (Ceballos, 2012).

Etapas II: La metodología desarrollada en este numeral se basa en la ponderación de condiciones físicas propias de la cuenca, como son la pendiente, el tipo de suelo, tipo de roca, cobertura vegetal y uso del suelo. La ponderación a usar en la evaluación de cada elemento va desde el 1 al 5, donde 1 corresponde al valor mas bajo (características menos favorables para que ocurra la recarga hídrica (Matus et al., 2009).

En la Figura 7 se presenta en terminos generales las características para la valoración de cada elemento biofísico.

Figura 7 Caracterización de los elementos biofísicos en función a la posibilidad de recarga hídrica.



Fuente: Adaptado de (Matus et al., 2009).

Según la metodología planteada por Matus, una vez obtenidos todos los mapas temáticos parciales se procede a realizar la determinación del potencial de las zonas de recarga hídrica mediante la aplicación de la siguiente ecuación:

$$ZR = [0.27(\text{Pend}) + 0.23(\text{Ts}) + 0.12(\text{Tr}) + 0.25(\text{Cve}) + 0.13(\text{Us})]$$

Donde:

Pend: Pendiente y micro relieve
 Ts: Tipo de suelo
 Tr: Tipo de roca
 Cve: Cobertura Vegetal
 Us: Usos de suelo

La asignación de pesos relativos a cada elemento se hace en función de la importancia de ese elemento en el proceso de infiltración del agua; o sea que los criterios que más favorecen la infiltración del agua en el suelo son los de mayor importancia (Pendiente, tipo de suelo y cobertura vegetal). Según el modelo propuesto por Matus, la interpretación de los resultados de la aplicación de la ponderación, se presentan en la siguiente tabla:

Tabla.1
Interpretación de los valores de potencial de recarga hídrica.

Posibilidad de recarga	Rango
Muy Alta	4.1-5
Alta	3.5-4.09
Moderada	2.6-3.49
Baja	2-2.59
Muy Baja	1.-1.99

Fuente: (Matus et al., 2009).

6 Resultados y discusión

De acuerdo con los objetivos planteados para la investigación, a continuación se presentan los resultados obtenidos para la identificación y mapeo de las zonas con potencial de recarga hídrica para la microcuenca del Río Botello.

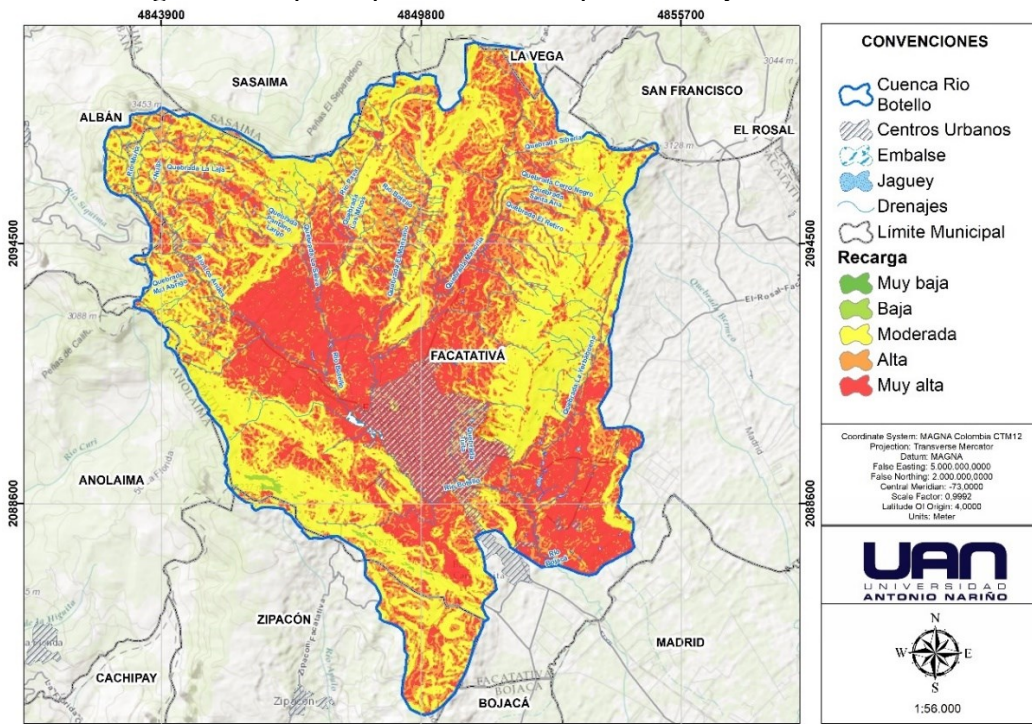
6.1 Variables de ponderación

6.1.1 Relieve y pendiente

La pendiente es un criterio que es directamente proporcional a escorrentía superficial, es así como, en los lugares donde se evidencian pendientes altas o fuertes, se imparte una mayor escorrentía y la infiltración es menor, mientras que, zonas con depresiones topográficas ayudan a aumentar la infiltración (Mokadem et al., 2018).

En la microcuenca objeto de estudio, se evidencia según el mapa de ponderación de pendientes (*Figura 8*) que las zonas con mayor potencial con base en esta variable corresponden al área del casco urbano de Facatativá, y principalmente, a la zona central del municipio que abarca parte de las veredas San Rafael, Los Manzanos La Selva y Prado, por su parte, las zonas con posibilidad de recarga moderada por valor de la pendiente se encuentran en la parte norte de la vereda Prado, en la vereda Mancilla, al norte del municipio en la vereda La tribuna y al occidente en las veredas de Pueblo Viejo y corito.

Figura 8. Mapa de ponderación de pendientes y micro relieve.



Fuente: Autor, 2020.

El mayor porcentaje de área de la microcuenca con base en la clasificación de pendientes, presenta un rango de recarga entre alto y muy alto, con aproximadamente el 62% (Tabla 8), lo anterior se debe a que la topografía predominante en el área evaluada presenta relieves planos y moderadamente ondulados o cóncavos, con pendientes entre 0 y 15%, por lo cual se puede determinar que estas áreas son fundamentales ya que están relacionadas directamente con la escorrentía superficial, y favorecen el proceso de recarga o infiltración del agua permitiendo que esta se encuentre en contacto mayor cantidad de tiempo con el suelo (Matus et al., 2009). Finalmente, se evidencia que el 38,30% de la cuenca presenta un valor de recarga por pendiente de moderada en las áreas en las cuales debido condiciones escarpadas se puede ver afectado el proceso de infiltración del agua en el suelo, por lo cual presentan un valor de recarga bajo, corresponden solamente al 0.31%, con superficies que presentan un valor de pendiente entre 45-65 %.

Tabla.2
 Área (ha) y porcentaje según pendiente y micro relieve.

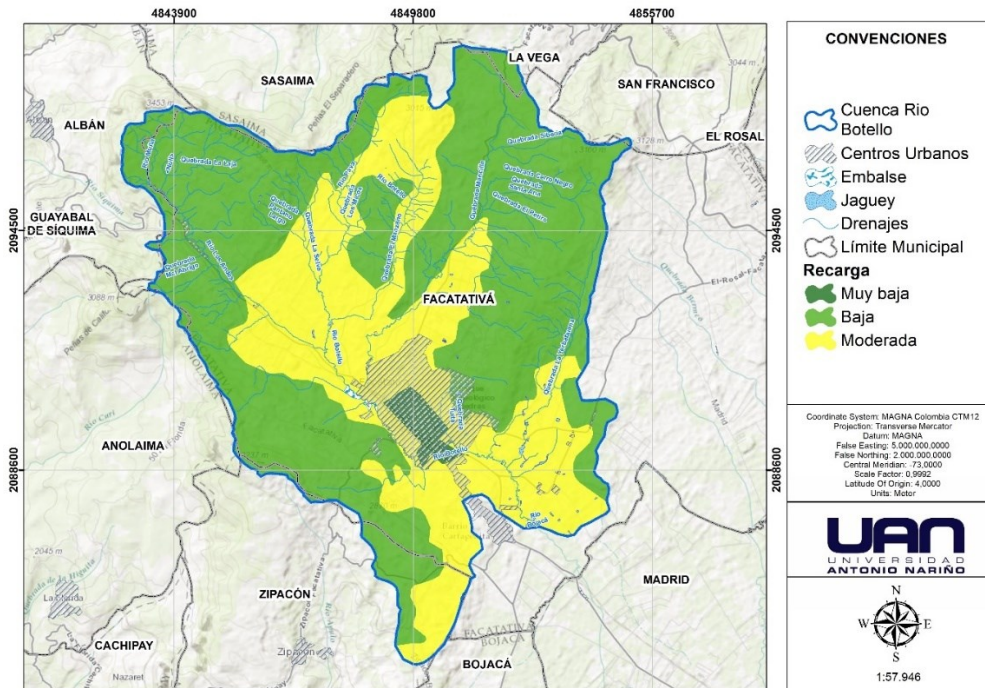
Posibilidad de recarga	Ponderación	Área (ha)	%
Muy Alta	5	3609,72	33,33
Alta	4	3026,65	27,95
Moderada	3	4147,81	38,30
Baja	2	32,61	0,31

Fuente: Autor, 2020.

6.1.2 Tipo de suelo

El resultado de la aplicación de este método de ponderación permite identificar espacialmente las áreas que con base en el tipo de suelo tienen mayor posibilidad de recarga hídrica (Figura 9), que para la microcuenca Río Botello, se encuentran principalmente localizadas en el sector norte, central y sur, correspondientes a parte de las veredas La Selva, Prado y Corito del municipio de Facatativá.

Figura 9. Mapa de ponderación de tipo de suelo.



Fuente: Autor, 2020.

Con base en los resultados obtenidos (Tabla.3) se observa que en el área del proyecto sobresalen los suelos que favorecen la infiltración de agua, con un 38% moderado y 60,43% bajo, lo anterior se debe a que en el área predominan los suelos de orden Inceptisol y Andisol, los primeros que se encuentran distribuidos ampliamente por la Sabana de Bogotá, ocupando áreas de planas a escarpadas en altitudes desde 200 m hasta 3800 m aproximadamente, por su parte los andisoles, son suelos que han recibidos aportes significativos de ceniza volcánica, son poco profundos, con rocas en materia orgánica. Según el mapa de unidades taxonómicas de suelos para la Sabana de Bogotá (Servicio Geológico Colombiano, 2004), estos suelos en general para el área de estudio se asocian a suelos finos del tipo limo arcillosos y a arenas limo arcillosas. Por lo tanto, teniendo en cuenta que el potencial o posibilidad de recarga considerando esta variable, se relaciona con la permeabilidad del suelo (Figueredo, 2019), sus características de textura media y fina generan suelos pesados o compactados que dificultan el proceso de recarga hídrica.

Tabla.3
Área (ha) y porcentaje según su textura.

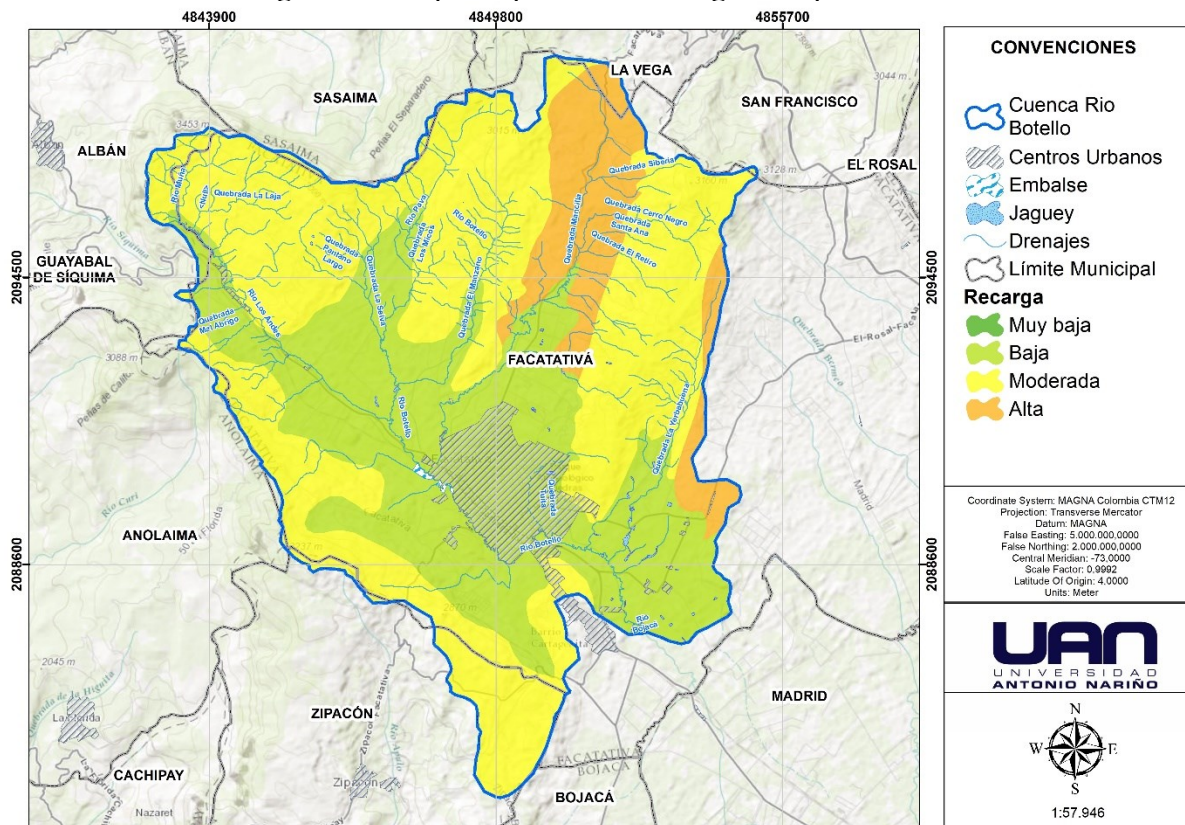
Posibilidad de recarga	Ponderación	Área (ha)	%
Moderada	4	4116,32	38,00
Baja	3	6543,76	60,43
Muy Baja	1	158,06	1,47

Fuente: Autor, 2020.

6.1.3 Tipo de roca

Por su parte, el mapa de ponderación para esta variable (*Figura 10*), permite establecer la distribución espacial de las áreas con posibilidad de recarga con base en el tipo de roca, identificando el mayor potencial de recarga (alta), en una pequeña área de la parte nororiental de la microcuenca, correspondiente a la vereda Mancilla del municipio de Facatativá, por otro lado, se evidencia el rango de recarga más bajo para esta variable (baja) abarcando la mayor área de la zona central y occidental de la microcuenca (Veredas Los Manzanos, Pueblo viejo y La Selva).

Figura 10. Mapa de ponderación según el tipo de roca.



Fuente: Autor, 2020.

Con base en el tipo de roca, la posibilidad de recarga para el área se encuentra entre baja (39.02%) y moderada (50.52 %) (Tabla.4). Algunas de estas áreas pertenecientes al grupo Guadalupe (Ksg) como la formación Arenisca Dura (Ksgd), la cual se caracteriza por tener una sucesión de

arcillolitas y lodolitas laminadas de color negro con intercalación de limolitas de cuarzo y cuarzo arenitas de grano fino a medio, así como la formación Plaeners (Ksgpl) que litológicamente se describe como una sucesión de arcillolitas laminadas, de baja dureza, limolitas silíceas laminadas, compactas con factura concoidea y por arenisca ortocuarcítica de grano fino a muy fino (Ecoforest, 2006), esta característica no favorece el proceso de recarga por su baja porosidad y poca permeabilidad.

Sin embargo, la cuenca presenta un área con posibilidad alta de recarga para esta variable, correspondiente la formación Guaguas (KPgu), que contempla una secuencia de arcillolitas rojas, la cual aflora en el valle del río Subachoque en la vereda La Hondura, y en el Norte de Facatativá, aflora en el sinclinal el Dintel; litológicamente es una sucesión de areniscas verdes friables de grano medio a grueso (Ecoforest, 2006), lo cual favorece a la recarga de un acuífero.

Tabla.4
Área (ha) y porcentaje según su geología.

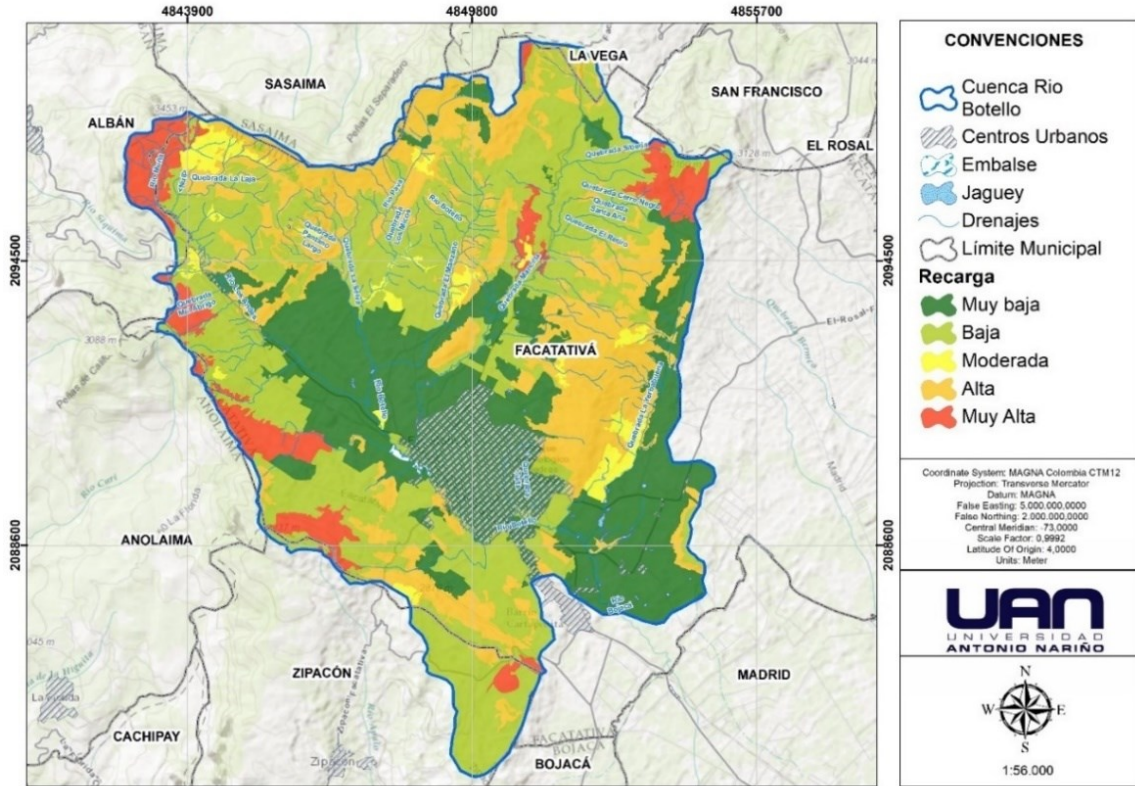
Posibilidad de recarga	Ponderación	Área (ha)	%
Alta	4	1120.92	10.35
Moderada	3	5471.31	50.52
Baja	2	4225.67	39.02

Fuente: Autor, 2020.

6.1.4 Cobertura Vegetal

Según el porcentaje de cobertura vegetal presente en el área de estudio (Tabla.5), se determina que la ponderación de la recarga para esta variable se encuentra desde muy baja a muy alta, (*Figura 11*).

Figura 11. Mapa de ponderación según porcentaje de cobertura vegetal.



Fuente: Autor, 2020.

Las áreas con mayor posibilidad de recarga (Tabla.5) corresponden a las zonas con bosques dentro de la cuenca en donde predominan especies nativas como el Helecho, Palma boba, el Cariseco, el Trompeto, la Fagara, el Duraznillo, el Aliso, el Aguacatillo, el Laurel, el Cedro Nogal, el Roble, el Tuno, entre otros (Administración Municipal de Facativá, 2012), representando aproximadamente el 7.22% , otras áreas de bosques que se evidencia en la zona de estudio son los bosques fragmentados y abiertos, con 28% representado las áreas con capacidad alta de recarga, se encuentran en mayor porcentaje que los anteriores, teniendo en cuenta procesos como la incursión de la explotación agropecuaria dentro de las áreas de bosque, que generan la subdivisión o creación de parches que a su vez disminuyen la densidad de bosque/cobertura (Rodríguez & Pérez, 2019). Finalmente, se observa que el mayor porcentaje de potencial de recarga para esta variable se encuentra en el rango de bajo y muy bajo, teniendo en cuenta que en la zona, como se

mencionaba anteriormente, se han presentado procesos acelerados de expansión de la frontera agrícola, desplazando o sustituyendo las áreas de coberturas naturales por zonas de cultivos, cultivos confinados e incluso pastos limpios con fines de ganadería (Henao, 2014; Rincón, 2012; Rodríguez & Pérez, 2019).

Estas áreas de bosque o de mayor cobertura vegetal permanente identificadas, son uno de los elementos fundamentales a considerar dentro de cualquier medida a implementar para la gestión del recurso, ya que facilitan la infiltración de agua, disminuyen la velocidad de la escorrentía, de la erosión, el impacto de la lluvia sobre la superficie del suelo y la evaporación y pérdida de humedad del suelo ocasionada por los rayos del sol. Esta variables en conjunto con las características del suelo, son las que mayor peso o participación tienen dentro del proceso de recarga y a su vez, por si sola, se resalta que estas áreas de bosques pueden cambiar la capacidad de suelos de granos finos mejorando la infiltración (Matus, 2007).

Tabla.5
Área (ha) y porcentaje según su cobertura vegetal.

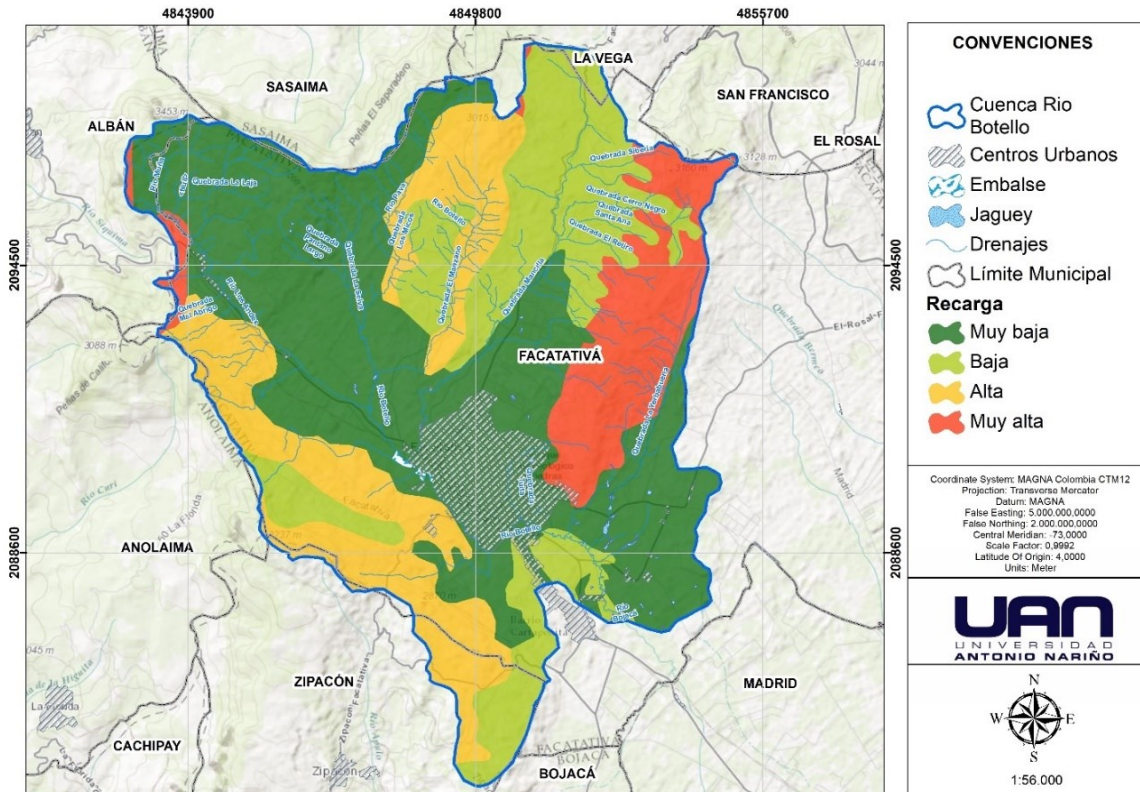
Posibilidad de recarga	Ponderación	Área (ha)	%
Muy Alta	5	781,38	7,22
Alta	4	2471,65	22,82
Moderada	3	325,10	3,00
Baja	2	4055,77	37,45
Muy Baja	1	3195,73	29,51

Fuente: Autor, 2020.

6.1.5 Uso del suelo

Con base en los resultados obtenidos para la ponderación de esta variable, se observa que la cuenca presenta posibilidad de recarga de acuerdo con el uso de suelo entre el rango de muy bajo a muy alto (Figura 12). Espacialmente, las zonas que presentan mayor posibilidad de recarga con base en esta variable se encuentran distribuidas en el sector oriental (muy alta) para las veredas Prado y Mancilla, y en el sector occidental en una zona comprendida entre las veredas Los Manzanos, Pueblo Viejo y Corito. Por su parte, las áreas con menores rangos (muy bajo y bajo) corresponden principalmente al sector norte de la microcuenca abarcando veredas como La tribuna y Selva y en el sector suroriental en la vereda Moyano del municipio de Facatativá.

Figura 12. Mapa de ponderación según uso de suelo.



Fuente: Autor, 2020.

Aproximadamente, el 68% del área de la cuenca presenta posibilidad de recarga entre muy baja y baja de acuerdo con el uso del suelo en el área (Tabla.6). Lo anterior se debe a que grandes extensiones de área tienen un uso principalmente para cultivos de tipo permanente o transitorios con manejo intensivo, debido a que dentro del municipio de Facatativá se tiene mayor extensión en los suelos clase III con capacidad para el desarrollo de cultivos y suelos clase II con capacidad para cualquier tipo de cultivo (Henaó, 2014), condiciones que incentivan al desarrollo de cultivos generando tensión sobre las coberturas naturales del territorio.

En menor proporción (11,61%) presenta potencial Muy alto para la recarga por este factor, encontrándose relacionado con los resultados de cobertura vegetal, que corresponden a las áreas de árboles, arbustos y hierbas densas, los cuales dentro de la cuenca corresponden a usos principales como forestal productor y forestal de protección (Mapa de Uso del Suelo, IGAC, 2001).

Es importante resaltar, que estas áreas han disminuido notoriamente a lo largo del tiempo, debido a los conflictos por modificación y sobreutilización del suelo, al reemplazar estas áreas de bosque con matrices de pastos con fines ganaderos y, cultivos permanentes y transitorios con manejo intensivo y semi-intensivo (Rodríguez & Pérez, 2019).

Tabla.6
Área (ha) y porcentaje según su tipo de suelo.

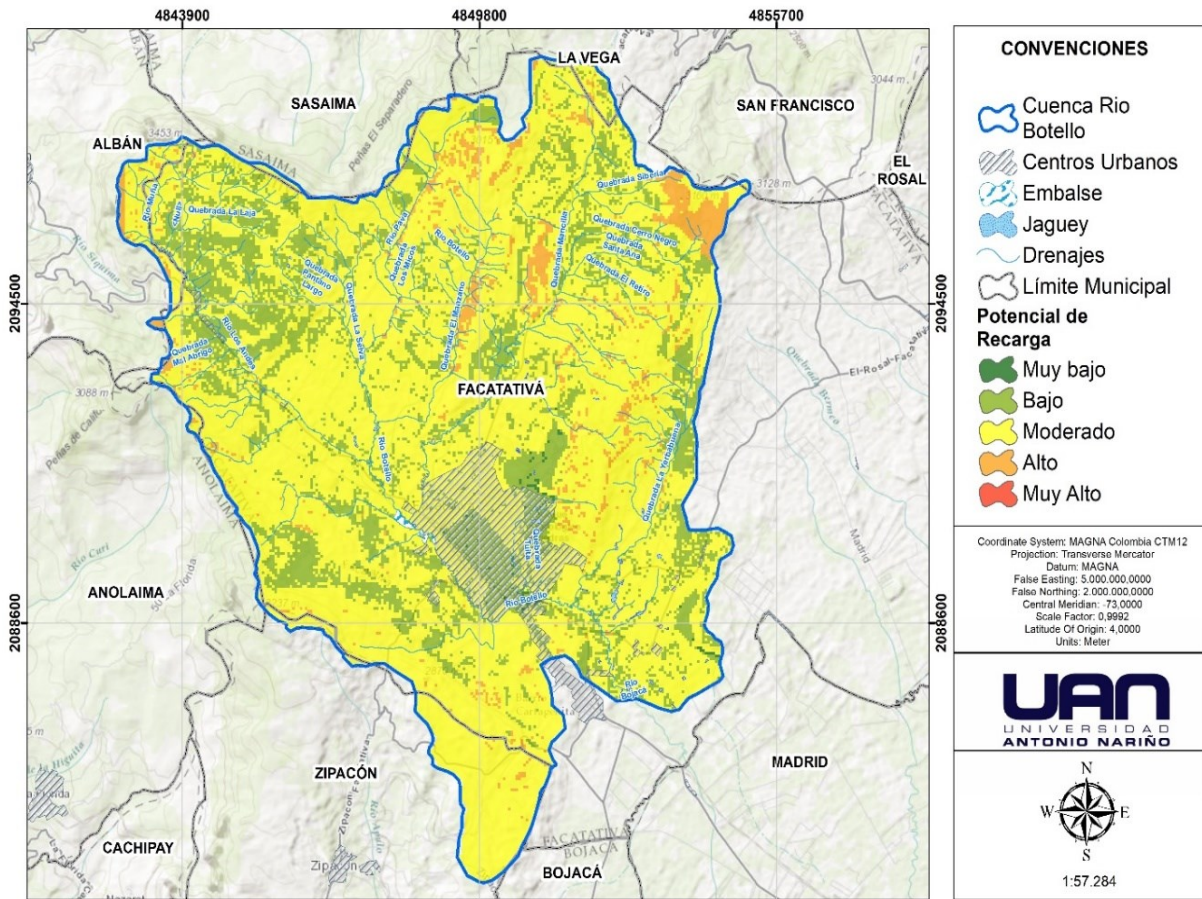
Posibilidad de recarga	Ponderación	Área (ha)	%
Muy Alta	5	1257.12	11.61
Alta	4	2099.94	19.39
Baja	2	2371.87	21.91
Muy Baja	1	5089.20	46.99

Fuente: Autor, 2020.

6.2 Potencial de recarga hídrica para el área de estudio

Con base en la superposición de las capas temáticas obtenidas, se aplicó el método planteado por Matus, 2009, con en el cual se obtuvo la distribución espacial de las zonas con mayor potencial de recarga hídrica en la microcuenca (Figura 13).

Figura 13. Mapa de zonas con potencial de recarga hídrica.



Fuente: Autor, 2020.

El área de estudio se encuentra catalogada de manera general como zona de recarga hídrica moderada (74,76%) (Tabla.7); en las zonas correspondientes a bosques y zonas de vegetación arbustiva, la recarga hídrica es entre alta y muy alta, como también toma valor la zonificación cartográfica de suelos en consociación de varias texturas, en donde predominan en mayor

porcentaje las texturas medias y granulares, parte de las cuales favorecen las capacidad de recarga superficial en armonía también con las pendientes suaves que se presenta en la gran parte del área de estudio.

Se evidencia que, si bien para la pendiente que es la variable con mayor peso dentro del cálculo (25%), la posibilidad de recarga varió de moderado a muy alto, al presentarse en el área microrelieves planos y cóncavos que favorecen el proceso de infiltración del agua en el suelo; en variables como el tipo de suelo y de coberturas, se encontraron extensas áreas con posibilidad de recarga baja y muy baja, al ser estas dos últimas variables con importante participación dentro del método empleado, se evidencia que debido a condiciones poco favorables como reducción en el porcentaje de cobertura vegetal natural permanente sobre el suelo, y características texturales del suelo en el área, que se relacionan con la baja densidad en la red drenaje de la cuenca (Antonio Paiba & Monroy Avila, 2015), disminuyen notoriamente el potencial de recarga hídrica para la zona de estudio, razón por la cual se evidencia que la mayor participación la tiene el porcentaje de recarga moderado y por el contrario, se encuentran escasas zonas con potencial de recarga hídrica alto o muy alto.

Se resalta que, en el 4,47% del área en donde se encontró un potencial de recarga hídrica alto, son zonas con una cobertura densa de bosque, definidas como uso forestal protector, con rocas moderadamente permeables, semisuaves; con pendientes entre el 15 y 45 % y con tamaños de partículas del suelo de medias a finas.

Tabla.7
Área (ha) y porcentaje de potencial de recarga hídrica.

Posibilidad de recarga	Ponderación	Área (ha)	%
Alta	4	494,48	4,57
Moderada	3	8096,75	74,76
Baja	2	2263,15	20,90
Muy Baja	1	22,34	0,20

Fuente: Autor, 2020.

Por otro lado, dentro del área de estudio, actividades como la deforestación que se lleva a cabo en las partes altas de la cuenca del río Botello es una de las principales causas del deterioro del recurso hídrico en la zona, lo anterior, asociado a la urbanización y a la expansión de la frontera agrícola para el desarrollo de cultivos tradicionales (Antonio Paiba & Monroy Avila, 2015), que corresponde a la principal causa de transformación de las áreas de bosque, y conlleva a la alteración de la calidad del recurso y a la disminución de su oferta como servicio ecosistémico que presta a la comunidad del municipio de Facatativá (Rodríguez & Pérez, 2019).

Lo que se evidencia en la disminución del potencial de recarga hídrica para la cuenca, notoriamente en el sector noreste de la cuenca cerca de las veredas la Tribuna y Mancilla, en las cuales, según lo establece el Plan de Ordenamiento Territorial del municipio de Facatativá son áreas de crecimiento agrícola intensivo, que gracias a las características del suelo favorecen el desarrollo de cultivos, los cuales son la actividad productiva predominante en el área evaluada.

Adicional a lo anterior, se conoce que el desequilibrio entre el suministro y la demanda de agua se ha incrementado en muchas partes del mundo, la falta de seguridad hídrica se atribuye a factores como el cambio climático, el crecimiento demográfico y la extracción insostenible del recurso,

principalmente de las aguas subterráneas (Fathi et al., 2020). Lo que se hace evidente en el área de estudio, ya que la influencia de las actividades antrópicas en el territorio influye en la gran problemática sobre la calidad y disponibilidad del recurso hídrico de la microcuenca, principalmente, para los habitantes del municipio que se abastecen del recurso en los afluentes del río para satisfacer sus necesidades básicas. Adicional a lo anterior, y teniendo en cuenta el desarrollo que se viene presentando en el municipio a través de las actividades agrícolas y pecuarias, se deben considerar las zonas con potencial de recarga hídrica moderado y que se desarrollan sobre coberturas de bosques naturales y seminaturales, como áreas críticas de recarga natural, ya que por sus características y la dinámica de la zona, si son sometidas a un manejo inadecuado (conversión a territorios agrícolas), son altamente susceptibles a disminuir su potencial de recarga (Bardales Espinoza, 2010).

Finalmente, teniendo en cuenta la importancia de las zonas con mayor potencial de recarga, como proveedoras de recurso hídrico, para el caso específico de estudio en el municipio de Facatativá, que presenta notable transformación que se ha dado a lo largo de estos años debido a la intervención antrópica, alterando la disponibilidad del recurso hídrico (Rodríguez & Pérez, 2019; Vega, 2011), se considera necesario la priorización de la conservación de las zonas con mayor potencial de recarga hídrica, de manera que estas áreas sean tenidas en cuenta dentro de la planificación y gestión sostenible del recurso y permitan realizar una evaluación de la vulnerabilidad de la zona.

7 Conclusiones

- Con base en los resultados de la implementación de la metodología de superposición de variables y la revisión bibliográfica, se pudo establecer que la pendiente, el tipo de suelo, tipo de roca, cobertura vegetal y uso del suelo; son los principales elementos empleados en la identificación de zonas de recarga e influyen en mayor medida en la ocurrencia y el movimiento del agua subterránea. Por su parte, para el área de estudio, la cobertura natural y el uso del suelo se consideran los factores más relevantes en el establecimiento del potencial de recarga hídrica, debido a que son los más sensibles y que presentan mayor dinámica dentro del área, debido a la intervención antrópica, principalmente, a los procesos de urbanización y expansión de la frontera agrícola, que disminuyen drásticamente el potencial de recarga a medida que se reduce la cubierta natural del suelo y a partir de esto, se modifica su uso.
- La microcuenca del Río Botello presenta zonas con potencial de recarga hídrica de muy bajo a alto, en mayor medida con el 74,76% de potencial moderado, el 25,24% restante se divide en 20,90%, 4,57% y 0,20 % para los rangos de bajo, alto y muy bajo respectivamente. El mayor potencial de recarga se encuentra en zonas con relieves ondulados, con suelos de tipo limo arcilloso, áreas de bosque naturales y seminaturales, y con usos del suelo para territorios agrícolas con cultivos de tipo permanente o transitorios con manejo intensivo, lo cual influyó en el bajo porcentaje de áreas con mayor potencial de recarga (alto y muy alto) a nivel general de la microcuenca.

8 Recomendaciones

- En la cuenca del río Botello, como fuente esencial del recurso hídrico para la comunidad, es importante llevar a cabo estrategias para la adecuada gestión y manejo del recurso, de manera que, sea fundamental la protección de las áreas con mayor potencial de recarga hídrica, ya que sirven de abastecimiento para los acuíferos, que a su vez son empleados como alternativas de abastecimiento de agua para la comunidad. Además, la implementación de planes de inversión para llevar a cabo acciones de rehabilitación y reforestación para el municipio espacialmente en la parte alta de la microcuenca podrían incrementar significativamente y a largo plazo el potencial de recarga hídrica, favoreciendo la infiltración hacia los acuíferos existentes en la zona.
- Los resultados obtenidos son una aproximación a la realidad del territorio evaluado, teniendo en cuenta que el método de participación de variables empleado para el caso de estudio se implementó a partir de información secundaria. Sin embargo, los resultados pueden ser empleados como base para llevar a cabo la formulación de estrategias de conservación en la cuenca a nivel local, y a su vez, partir de ellos se recomienda la elaboración de investigaciones posteriores, para la priorización de la conservación de las áreas identificadas con mayor potencial de recarga en la microcuenca.
- Se resalta la importancia de la escala de la información empleada, debido a que se evidenció que para el caso de estudio la principal limitante fue la disponibilidad de la información o capas temáticas con mayor escala de detalle; por lo anterior, se recomienda apoyar con información primaria futuras investigaciones del área de estudio, para realizar la validación de la información cartográfica empleada.

9 Referencias

- Abijith, D., Saravanan, S., Singh, L., Jennifer, J. J., Saranya, T., & Parthasarathy, K. S. S. (2020). GIS-based multi-criteria analysis for identification of potential groundwater recharge zones - a case study from Ponnaniyar watershed, Tamil Nadu, India. *HydroResearch*, 3, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.hydres.2020.02.002>
- Aguilar Arias, H., Mora Zamora, R., & Vargas Bolaños, C. (2015). Metodología Para La Corrección Atmosférica De Imágenes Aster, Rapideye, Spot 2 Y Landsat 8 Con El Módulo Flaash Del Software Envi. Atmospheric Correction Methodology for Aster, Rapideye, Spot 2 and Landsat 8 Images With Envi Flaash Module Software. *Revista Geográfica de América Central*, 2(53). <https://doi.org/10.15359/rgac.2-53.2>
- Altafi Dadgar, M., Nakhaei, M., Porhemmat, J., Eliasi, B., & Biswas, A. (2020). Potential groundwater recharge from deep drainage of irrigation water. *Science of the Total Environment*, 716, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137105>
- Andrade, R., & Guru, B. (2020). Recharge site delineation through integrated geophysical hydrological and GIS approach – A basic understanding with case studies from Indian sub-continent. *Groundwater for Sustainable Development*, 10(September 2019), 100343. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2020.100343>
- Antonio Paiba, A. O., & Monroy Avila, E. F. (2015). Modelación hidrodinámica y determinación de la calidad del agua en el río Botello, Facatativá, Cundinamarca, Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 6(1), 169. <https://doi.org/10.22490/21456453.1272>
- Arshad, A., Zhang, Z., Zhang, W., & Dilawar, A. (2020). Mapping favorable groundwater potential recharge zones using a GIS-based analytical hierarchical process and probability frequency ratio model: A case study from an agro-urban region of Pakistan. *Geoscience Frontiers*. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2019.12.013>
- Ashaolu, E. D. (2020). Spatial and temporal recharge estimation of the basement complex in Nigeria, West Africa. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 27(December 2019), 100658. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2019.100658>
- Bardales Espinoza, W. A. (2010). Metodología para la identificación de zonas de recarga hídrica naturales en las cuencas de Guatemala. *Predda*, 1–10. https://www.sica.int/documentos/metodologia-para-la-identificacion-de-zonas-de-recarga-hidrica-naturales-en-las-cuencas-de-guatemala_1_47127.html
- Batelaan, O., & De Smedt, F. (2007). GIS-based recharge estimation by coupling surface-subsurface water balances. *Journal of Hydrology*, 337(3–4), 337–355. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.02.001>
- Bueso Campos, M. L. (2010). IDENTIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LAS ZONAS CON MAYOR POTENCIAL DE RECARGA HÍDRICA EN LAS SUBCUENCAS DE LOS RÍOS TACÓ OTENCIAL DE RECARGA HÍDRICA EN LAS SUBCUENCAS DE LOS RÍOS TACÓ Y SHUSHO, MUNICIPIO DE CHIQUIMULA. *CONCYT*, 046.
- Ceballos, C. G. (2012). *Estudio multitemporal con imágenes landsat Tm 5 de la variación de la cobertura del suelo de la región circundante a una zona de lahar volcánico : Caso de estudio volcán nevado del Ruiz (1985-2011)*. 1–61.

- Chatterjee, R. S., Pranjali, P., Jally, S., Kumar, B., Dadhwal, V. K., Srivastava, S. K., & Kumar, D. (2020). Potential groundwater recharge in north-western India vs spaceborne GRACE gravity anomaly based monsoonal groundwater storage change for evaluation of groundwater potential and sustainability. *Groundwater for Sustainable Development*, 10(November 2019), 100307. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2019.100307>
- Chávez-Gómez, J. D., Flores-Martínez, J. A., & Paiz-Saravia, E. J. (2017). *Caracterización de zonas potenciales de recarga acuífera en el Municipio de San Jorge, San Miguel, El Salvador*. 123.
- CORANTIOQUIA. (2002). *Estudio De Zonas De Recarga Y Acuíferos Del Valle De Aburra*. http://www.corantioquia.gov.co/ciadoc/AGUA/AIRNR_CN_2420_2000.pdf
- Coy, M. (2015). *Identificación de zonas potenciales de recarga hídrica en el subcuenca del Río TZUNUTZ*. https://www.bertelsmann-stiftung.de/fileadmin/files/BSt/Publikationen/GrauePublikationen/MT_Globalization_Report_2018.pdf[http://eprints.lse.ac.uk/43447/1/India_globalisation_society_and_inequalities\(lsero\).pdf](http://eprints.lse.ac.uk/43447/1/India_globalisation_society_and_inequalities(lsero).pdf)<https://www.quora.com/What-is-the>
- Daesslé, L. W., Andrade-Tafoya, P. D., Lafarga-Moreno, J., Mählknecht, J., van Geldern, R., Beramendi-Orosco, L. E., & Barth, J. A. C. (2020). Groundwater recharge sites and pollution sources in the wine-producing Guadalupe Valley (Mexico): Restrictions and mixing prior to transfer of reclaimed water from the US-México border. *Science of the Total Environment*, 713. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136715>
- Donis, L. (2015). IDENTIFICACIÓN DE ZONAS DE RECARGA HÍDRICA EN LA MICROCUENCA DEL RÍO NEGRO, CIUDAD DE GUATEMALA SISTEMATIZACIÓN DE PRÁCTICA PROFESIONAL. *Universidad Rafael Landívar*, 151(2005), 10–17. <https://doi.org/10.1145/3132847.3132886>
- Ecoforest. (2006). *Elaboración del Diagnostico, Prospectiva y Formulación de la Cuenca Hidrográfica del río Bogotá Subcuenca del Río Balsillas*.
- Fathi, S., Hagen, J. S., & Haidari, A. H. (2020). Synthesizing existing frameworks to identify the potential for Managed Aquifer Recharge in a karstic and semi-arid region using GIS Multi Criteria Decision Analysis. *Groundwater for Sustainable Development*, 100390. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2020.100390>
- Figueredo, J. (2019). *METODOLOGÍA PARA DETERMINAR ZONAS DE RECARGA HÍDRICA EN MUNICIPIOS O COMUNIDADES CON RECURSOS FINANCIEROS LIMITADOS* (pp. 1–24).
- Gebru, T. A., & Tesfahunegn, G. B. (2020). GIS based water balance components estimation in northern Ethiopia catchment. *Soil and Tillage Research*, 197(October 2019), 104514. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104514>
- Ghayoumian, J., Mohseni Saravi, M., Feiznia, S., Nouri, B., & Malekian, A. (2007). Application of GIS techniques to determine areas most suitable for artificial groundwater recharge in a coastal aquifer in southern Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*, 30(2), 364–374. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2006.11.002>
- Guo, X., Feng, Q., Si, J., Xi, H., Zhao, Y., & Deo, R. C. (2019). Partitioning groundwater recharge sources in multiple aquifers system within a desert oasis environment: Implications for water

- resources management in endorheic basins. *Journal of Hydrology*, 579(May), 124212. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124212>
- Hall, B., Currell, M., & Webb, J. (2020). Using multiple lines of evidence to map groundwater recharge in a rapidly urbanising catchment: Implications for future land and water management. *Journal of Hydrology*, 580(August 2019), 124265. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124265>
- Henao, A. (2014). Capítulo 4 Reconocimiento Físico del Territorio. In I. Habitat (Ed.), *Habitat integral* (pp. 1–78).
- IDEAM. (2013). *Zonificación y Codificación de Cuencas Hidrográficas IDEAM*. 46. <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/022655/MEMORIASMAPAZONIFICACIONHIDROGRAFICA.pdf>
- Lentswe, G. B., & Molwalefhe, L. (2020). Delineation of potential groundwater recharge zones using analytic hierarchy process-guided GIS in the semi-arid Motloutse watershed, eastern Botswana. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 28(February), 100674. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2020.100674>
- Machiwal, D., & Jha, M. K. (2015). GIS-based water balance modeling for estimating regional specific yield and distributed recharge in data-scarce hard-rock regions. *Journal of Hydro-Environment Research*, 9(4), 554–568. <https://doi.org/10.1016/j.jher.2014.07.004>
- Malik, M. S., & Shukla, J. P. (2019). GIS modeling approach for assessment of groundwater vulnerability in parts of Tawa river catchment area, Hoshangabad, Madhya Pradesh, India. *Groundwater for Sustainable Development*, 9(July), 100249. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2019.100249>
- Matus, 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. *Escuela de Posgrado Programa de Educación Para El Desarrollo y La Conservación Del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza*, Magister S, 121. http://repositorio.bibliotecaorton.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/5392/Participatory_development_of_a_methodology.pdf;jsessionid=C76CC5E2FFFD8EBE36B483EB5BC0F6B2?sequence=1
- Matus, O., Faustino, J., & Jiménez, F. (2009). Guía para la identificación participativa de zonas con potencial de recarga hídrica. Aplicación práctica en la subcuenca del río Jucuapa, Nicaragua. *CATIE (Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza) . División de Investigación y Desarrollo, Serie técn*(38), 40. www.catie.ac.cr
- Mautner, M. R. L., Foglia, L., Herrera, G. S., Galán, R., & Herman, J. D. (2020). Urban growth and groundwater sustainability: evaluating spatially distributed recharge alternatives in the Mexico City Metropolitan Area. *Journal of Hydrology*, 586(April), 124909. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124909>
- Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo. (2014). *Guía Técnica para la formulación de los POMCAS*. 104.
- Moeck, C., Grech-Cumbo, N., Podgorski, J., Bretzler, A., Gurdak, J. J., Berg, M., & Schirmer, M. (2020). A global-scale dataset of direct natural groundwater recharge rates: A review of

- variables, processes and relationships. *Science of the Total Environment*, 717(February), 137042. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137042>
- Mokadem, N., Boughariou, E., Mudarra, M., Ben Brahim, F., Andreo, B., Hamed, Y., & Bouri, S. (2018). Mapping potential zones for groundwater recharge and its evaluation in arid environments using a GIS approach: Case study of North Gafsa Basin (Central Tunisia). *Journal of African Earth Sciences*, 141, 107–117. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2018.02.007>
- Peng, T. R., Lu, W. C., Chen, K. Y., Zhan, W. J., & Liu, T. K. (2014). Groundwater-recharge connectivity between a hills-and-plains' area of western Taiwan using water isotopes and electrical conductivity. *Journal of Hydrology*, 517, 226–235. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.05.010>
- Rincón, A. V. M. (2012). Análisis de la expansión urbana del municipio de Facatativá desde las políticas de ordenamiento territorial en el periodo 2002-2011. *Perspectiva Geográfica*, 17, 123–146.
- Rodríguez, A., & Pérez, P. (2019). *Análisis espacio-temporal del proceso de fragmentación de bosques en la microcuenca “Río Botello”, mediante el uso de tecnologías de la información geográfica.*
- Sasidharan, S., Bradford, S. A., Šimůnek, J., & Kraemer, S. R. (2020). Groundwater recharge from drywells under constant head conditions. *Journal of Hydrology*, 583(September 2019). <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124569>
- Singh, L. K., Jha, M. K., & Chowdary, V. M. (2017). Multi-criteria analysis and GIS modeling for identifying prospective water harvesting and artificial recharge sites for sustainable water supply. *Journal of Cleaner Production*, 142, 1436–1456. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.11.163>
- Singh, S. K., Zeddies, M., Shankar, U., & Griffiths, G. A. (2019). Potential groundwater recharge zones within New Zealand. *Geoscience Frontiers*, 10(3), 1065–1072. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2018.05.018>
- Vega, H. (2011). *Propuesta Para Promover el Manejo Eficiente del Recurso Hídrico en la Microcuenca Alta del Río Botello en el Municipio de Facatativá, Desde el Marco de la Gestión Integral del Agua.*
- Vélez Otálvaro, M., & Vásquez Ariza, L. (2004). Métodos para determinar la recarga en acuíferos. *Avances En Recursos Hidraulicos*, 11, 51–62.
- Wiebe, A. J., & Rudolph, D. L. (2020). On the sensitivity of modelled groundwater recharge estimates to rain gauge network scale. *Journal of Hydrology*, 585(February), 124741. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124741>
- Yeh, H. F., Cheng, Y. S., Lin, H. I., & Lee, C. H. (2016). Mapping groundwater recharge potential zone using a GIS approach in Hualian River, Taiwan. *Sustainable Environment Research*, 26(1), 33–43. <https://doi.org/10.1016/j.serj.2015.09.005>