

Artículo de investigación.

Cómo citar: D. Herrera y V. Posada. "Metodologías de recarga de agua subterránea en un sistema de producción de *Tectona grandis* Linn F. (Teca), en la finca San Felipe, Yacopí". *Inventum*, vol. 15, No. 29, pp 3-21. DOI: 10.26620/uniminuto.inventum.15.29.2020.3-21

Editorial: Corporación Universitaria Minuto de Dios - UNIMINUTO.

ISSN: 1909-2520
eISSN: 2590-8219

Fecha de recibido: Mayo 31 de 2020
Fecha de aprobado: Junio 15 de 2020
Fecha de publicación: Julio 15 de 2020

Conflicto de intereses: los autores han declarado que no existen intereses en competencia.

Metodologías de recarga de agua subterránea en un sistema de producción de *Tectona grandis* Linn F. (Teca), en la finca San Felipe, Yacopí

Groundwater recharge methodologies in a *Tectona grandis* Linn F. (Teca) production system, at the San Felipe farm, Yacopí

Metodologias de recarga de água subterrânea em um sistema de produção de *Tectona grandis* Linn F. (Teca), na Fazenda San Felipe, Yacopí

Resumen

El presente trabajo consiste en una propuesta que integra metodologías de recarga de agua subterránea para sistemas sostenibles de producción. Para este propósito, se seleccionó el siguiente cultivo de *Tectona grandis* Linn F. (Reino: *Plantae*, filum: *Spermatophyta*, subphylum: *Angiospermae*, clase: *Dicotyledonae*, orden: *Lamiales* Familia: *Lamiaceae*), debido a que este germina en lugares con temperaturas de 22°C a 28° C y permite generar condiciones favorables en el terreno, como el enfriamiento de las raíces, lo cual incrementa la absorción de agua subterránea por medio de la evapotranspiración de cada plántula. Lo anterior, se da debido a que, en este proceso, se aumenta la cantidad de vapor de agua en la atmósfera, lo que a su vez intensifica la precipitación en la zona y multiplica, como se mencionó, la recarga de agua subterránea, porque mantiene temperaturas bajas en el subsuelo donde se acentúan las raíces. También posibilita que se adquiera en la finca otra actividad económica, como es el negocio de la comercialización y venta de madera en la finca San Felipe [1], [2]. Además, se sugiere la implementación de siembra en surcos con la metodología de línea clave, la cual consiste en que por la acción de la gravedad el agua fluya de vertiente a ladera a través de unos espacios en el suelo y de esta forma maximizar la infiltración de agua en el subsuelo. Por último, se planea poner en funcionamiento el VAC System, técnica complementaria para el reciclaje de nutrientes y residuos siendo eficiente para la producción en torno a las actividades económicas que se pueden ejecutar en una finca. En conclusión, se pudo determinar que, mediante la implementación de las dos metodologías conjuntas conllevaría a obtener una mayor eficiencia en la optimización de captación de agua subterránea, lo cual se corrobora mediante una comparación entre los litros de agua que se obtienen en cada caso.

Herrera Báez Daniela
dherreraba@unbosque.edu.co
ORCID: 0000-0002-1436-592X,
Universidad El Bosque,
Colombia

Posada Luna Valentina
vposada@unbosque.edu.co
ORCID: 0000-0002-6841-2680,
Universidad El Bosque,
Colombia



Palabras clave: agua subterránea, sistema integrado sostenible, simulación hidrológica, surcos de infiltración australianos, *Tectona grandis* Linn F, VAC System.

Abstract

The present work consists of a proposal that integrates groundwater recharge methodologies for sustainable production systems. For this purpose, the following culture of *Tectona grandis* Linn F. (Kingdom: *Plantae*, filum: *Spermatophyta*, subphylum: *Angiospermae*, class: *Dicotyledonae*, order: *Lamiales* Family: *Lamiaceae*) was selected, because it germinates in places with temperatures of 22°C to 28°C and allows the generation of favorable conditions in the soil, such as cooling of the roots, which increases the absorption of groundwater through the evapotranspiration of each seedling. This is due to the fact that in this process, the amount of water vapor in the atmosphere is increased, which in turn intensifies precipitation in the area and multiplies, as mentioned, the groundwater recharge, because it maintains low temperatures in the subsoil where the roots are accentuated. It also enables another economic activity to be acquired on the farm, such as the business of marketing and selling wood on the San Felipe farm [1], [2]. In addition, the implementation of row planting is suggested with the key line methodology, which consists in that by the action of gravity the water flows from slope to slope through some spaces in the soil and in this way maximize infiltration. of water in the subsoil. Finally, it is planned to put into operation the VAC System, a complementary technique for the recycling of nutrients and waste, being efficient for the production around the economic activities that can be carried out on a farm. In conclusion, it was determined that, through the implementation of the two joint methodologies, it would lead to greater efficiency in the optimization of groundwater capture, which is corroborated by a comparison between the liters of water obtained in each case.

Keywords: groundwater, sustainable integrated system, hydrological simulation, australian seepage furrows, *Tectona grandis* Linn F, VAC System.

Resumo

O presente trabalho consiste em uma proposta que integra metodologias de recarga de água subterránea para sistemas de produção sustentáveis. Para tanto, foi selecionada a seguinte cultura de *Tectona grandis* Linn F. (Reino: *Plantae*, filum: *Spermatophyta*, subfilo: *Angiospermae*, classe: *Dicotyledonae*, ordem: *Família Lamiales: Lamiaceae*), por germinar em locais com temperaturas de 22°C a 28°C e permite a geração de condições favoráveis no solo, como o resfriamento das raízes, o que aumenta a absorção da água subterránea através da evapotranspiração de cada muda. Isso se deve ao fato de que, nesse processo, aumenta-se a quantidade de vapor d'água na atmosfera, o que por sua vez intensifica as precipitações na região e multiplica, conforme citado, a recarga do lençol freático, pois mantém baixas temperaturas no subsolo onde as raízes são acentuadas. Também possibilita a aquisição de outra atividade econômica na fazenda, como o negócio de comercialização e venda de madeira na fazenda San Felipe [1], [2]. Além disso, sugere-se a implantação do plantio em linha com a metodologia da linha-chave, que

consiste em que pela ação da gravidade a água flua de encosta a encosta através de alguns espaços do solo e desta forma maximize a infiltração de água no subsolo. Por fim, está prevista a operacionalização do Sistema VAC, uma técnica complementar para a reciclagem de nutrientes e resíduos, sendo eficiente para a produção em torno das atividades econômicas que podem ser realizadas em uma fazenda. Em conclusão, determinou-se que, com a implementação das duas metodologias conjuntas, se obteria maior eficiência na otimização da captação das águas subterráneas, o que é corroborado pela comparação entre os litros de água obtidos em cada caso.

Palavras-chave: água subterránea, sistema integrado sustentável, simulação hidrológica, sulcos de infiltração australianos, *Tectona grandis* Linn F, Sistema VAC.

I. INTRODUCCIÓN

La finca San Felipe se encuentra ubicada al norte de Cundinamarca en el municipio de Yacopí, allí se desarrollan algunas actividades agrícolas como sustento económico; por ejemplo: cultivos artesanales de hortalizas, frutales (naranja, limón, mandarina), plantas de tubérculos (yuca, arracacha) y de plátano. Además, otras actividades económicas como ganadería, piscicultura, avicultura y porcicultura. Es importante destacar que el ganado vacuno, al ser la actividad que más se ejecuta, requiere de grandes extensiones del terreno, lo cual disminuye la posibilidad de siembra. Esto ha afectado el paisaje natural de la finca puesto que se han talado árboles para la extensión de los pastizales utilizados en la ganadería, por lo que gran parte del agua subterránea ha disminuido debido a la ausencia de plantas que ayuden a la infiltración del recurso hídrico.

Como se menciona, la alta producción ganadera genera una masiva deforestación, lo que a su vez propicia que la precipitación tenga una reducción en el terreno. En la figura 1 se muestra la relación inversamente proporcional entre estos factores en la zona a evaluar. En los años 2012 y 2015, se observa un alto grado de deforestación, lo cual hace que por la insuficiente cobertura en el suelo esta tienda

a poseer un elevado índice de escurrimiento, lo que genera grandes pérdidas de agua subterránea y por lo tanto de vapor de agua, el cual es proporcionado por los árboles en el proceso de evapotranspiración. De igual manera se disminuye la precipitación en la zona [3]. Todo lo anterior, es consecuencia de la ganadería extensiva que demanda la desmesurada tala de árboles, lo cual genera además de las afectaciones ya mencionadas, un suelo en descubierto, que al poseer una radiación directa, aumenta rápidamente su temperatura, lo que reduce la capacidad que tiene este de infiltrar el recurso hídrico y por consiguiente, perjudica en gran medida a los cultivos, principalmente en las épocas secas, ya que limita la recarga de agua subterránea a la que estos pueden recurrir.

La zona establecida como área de estudio presenta una vegetación de tipo pastura, cuya capacidad de captación de agua subterránea resulta mínima según lo explicado con anterioridad. Por lo tanto, se propone la búsqueda de metodologías que aumenten la captación del recurso hídrico con el fin de incrementar la producción de las actividades económicas existentes en la zona, sin que estas dependan constantemente de la temporada climática y de esta manera, optimizar la capacidad hidrológica del sistema de forma integrada y sostenible para la finca San Felipe.

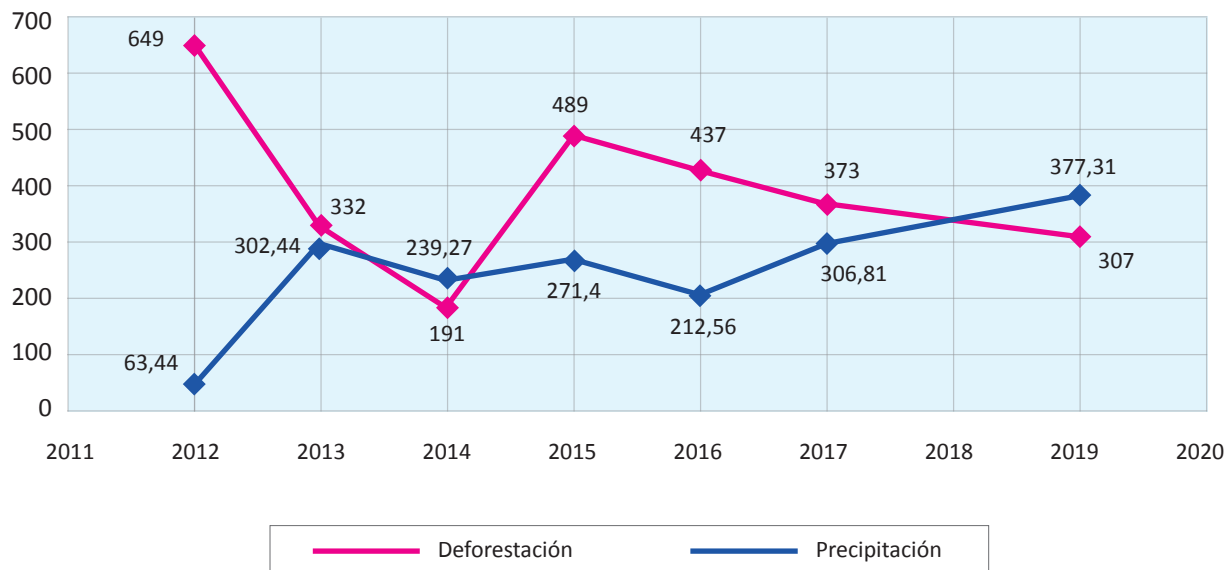


Figura 1. La afectación de la deforestación en la precipitación, estando la precipitación en milímetros y la deforestación en Hectáreas

Fuente: elaboración propia, adaptado del IDEAM, 2020.

II. OBJETIVOS

A. Objetivo general

Analizar diferentes metodologías para la optimización hidrológica subterránea y superficial en la finca San Felipe ubicada en Yacopí con el fin de que este recurso sea aprovechado de forma sostenible para el beneficio de las actividades económicas que se desarrollan en el terreno.

B. Objetivos específicos

1. Diagnosticar la cantidad de agua subterránea que naturalmente adquiere la finca al poseer un suelo con cobertura de pastura, mediante el número de curva que se compone del índice de escorrentía e infiltración.
2. Identificar las condiciones actuales de vegetación mediante el NDVI (Índice de vegetación de diferencia normalizada, por sus siglas en inglés) para saber a qué condiciones físicas está sometida la finca y conjuntamente, determinar los depósitos de agua para así reconocer el sitio de mayor captación de agua de la cuenca.

3. Seleccionar metodologías como los surcos de infiltración y la siembra de una especie maderable, respectivamente, que permitan un mejor aprovechamiento del agua subterránea y que generen un ingreso económico.
4. Simular cómo las zanjas de infiltración y la siembra de la especie maderable seleccionada permiten retener el agua en el subsuelo, y determinar la viabilidad de estas, respecto a la situación de la finca.
5. Proponer un diseño de la finca en donde se plasmen las metodologías estudiadas como mecanismos de optimización hidrológica y contribuyan a la implementación del VAC System.

III. METODOLOGÍA

Inicialmente, se definió como área de estudio la finca San Felipe ubicada en el municipio de Yacopí, Cundinamarca (figura 2). Para determinar la recarga de acuíferos de la finca se realizó una consulta de los datos hidrometeorológicos de la zona en la página Web de DHIME IDEAM (Sistema de Información para la gestión de datos Hidroló-



Figura 2. Polígono de la finca San Felipe ubicada en Google Earth.

Fuente: elaboración propia con apoyo de Google Earth, 2020.

gicos y Meteorológicos, por sus cifras en inglés, del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales). Una vez se ingresa a la página y al haber aceptado los términos pertinentes, se localiza el municipio del sitio de estudio para posteriormente identificar las estaciones meteorológicas más cercanas, precisando y verificando que estas no sean limnimétricas, dado que miden los caudales de los ríos y no resultan útiles para la presente investigación. De esta manera, se eligieron estaciones cercanas a la finca que se encontraban en funcionamiento seleccionándose la estación PORVENIR EL [26060370], cuya fecha de instalación es de agosto 15 de 1991 y aún se encuentra activa.

Después se modificaron las fechas, estableciéndose una precipitación estándar total mensual pluviógrafo y el departamento y municipio de la estación, para descargar todos estos datos mencionados en un archivo de Excel, el cual permitió organizar la información por años y arrojó datos de evaporación y precipitación de la zona. Luego, se calculó el promedio del mes faltante obteniendo una secuencia adecuada y se dejaron estos valores calculados en los valores faltantes

del mes. Posteriormente se pasaron manualmente a Python adquiriendo gráficas de precipitación y evaporación del mes.

Seguidamente, para hallar el NDVI se buscó la información en Earth Explorer USGS (Servicio Geológico de los Estados Unidos, por sus siglas en Inglés), en la cual se seleccionaron las temporadas más secas, entre los años 1991 y 2019, con el objetivo de poder visualizar el terreno de la finca en las condiciones menos favorables, en cuanto a la captación de agua subterránea y superficial, de manera que se lograra hacer un análisis con relación de estas características hídricas con los puntos de drenaje y con la vegetación de la zona. Además, se utilizaron los períodos del año 2014, correspondiente al tercer año más árido, específicamente en el mes de enero, debido a que del período 2012, considerado como el más seco, no se encontraba información en la página Earth Explorer USGS. (Ver figura 3)

Después, se trasladaron al programa QGIS las fotografías que contenían las bandas 4 y 5, las cuales hacen referencia a los rayos rojos (RED) e infrarrojo cercano (NIR) respectivamente; estas

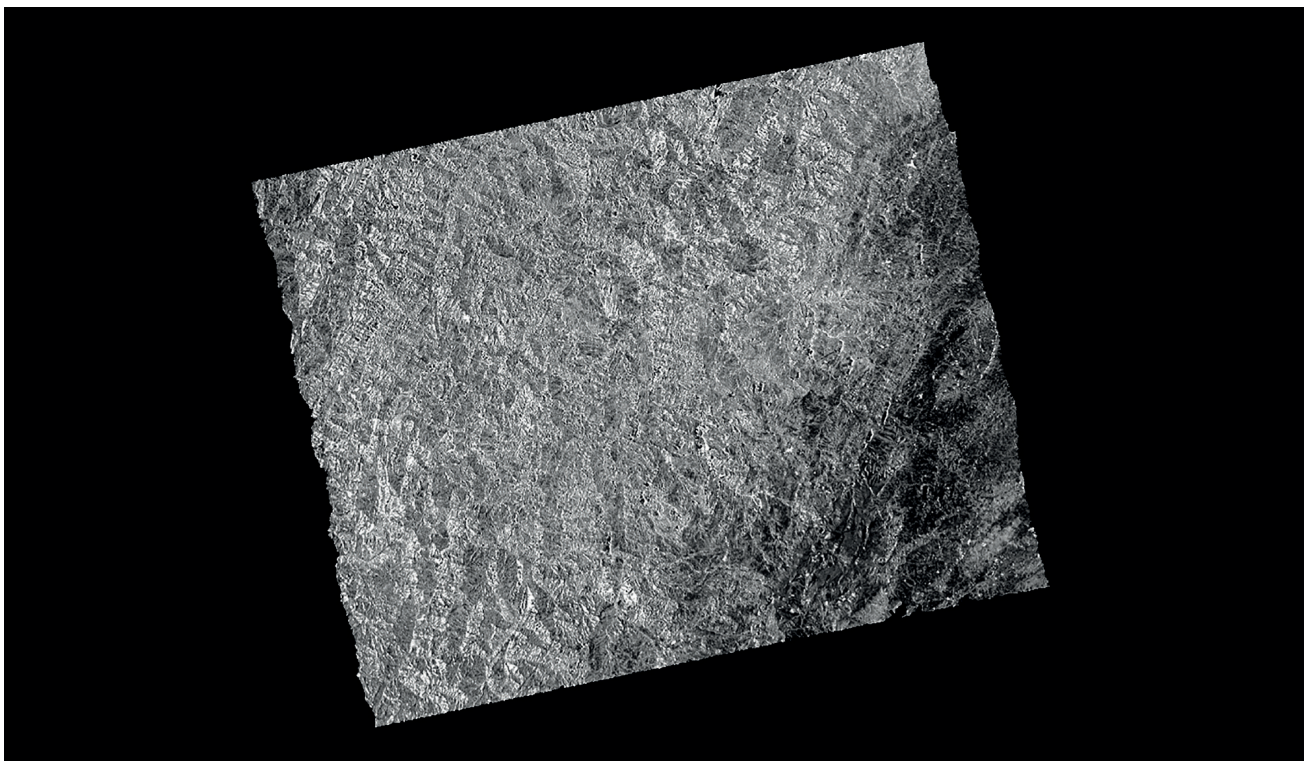


Figura 3. Módulo digital de elevación de la región donde se ubica la finca.

Fuente: Earth Explorer USGS.

permiten calcular, con las longitudes de ondas que se propagan en las bandas espectro electromagnéticas, los sitios específicos donde hay mayor o menor cantidad de vegetación, de agua subterránea y de agua superficial. Para sintetizar estas características en un solo mapa, se implementó la ecuación 1, después se modificaron las propiedades de esta, para hacer una leyenda de colores con rangos entre -1 y 1, luego se modificó a rangos -1 y 0, posteriormente se cambió al rango 0 y 1.

$$\frac{\text{Banda 5} - \text{Banda 4}}{\text{Banda 5} + \text{Banda 4}} \quad (1)$$

Por otra parte, con el objetivo de conocer el comportamiento de la lluvia para la captación de agua subterránea, se utilizó el programa QGIS donde se ejecutaron una serie de pasos. Estos consisten inicialmente en añadir el modelo digital de elevación (DEM, por sus siglas en inglés) de la región donde se ubica la finca, dado que este informa sobre los procesos de los drenajes en el lugar, para así poder evaluar la modificación de su flujo con el objetivo de tener una mayor

optimización del recurso hídrico [4]. Posteriormente, se agregó el polígono y mediante la ayuda de la herramienta HEC-GeoHMS junto con la opción de ráster, se ejecutó el recorte de las dos imágenes para mostrar las líneas de drenaje, con las cuales se logró realizar la delimitación de la cuenca [5]. Lo anterior permitió la posibilidad de dimensionar las condiciones óptimas para la captación del agua en la finca y de esta manera, implementar mecanismos de captación como el VAC System. Además, las líneas de drenaje y la cuenca posibilitaron la ejecución de los mecanismos de cultivos como los surcos, los cuales tienen como objetivo llevar el agua que se escurre de vertiente a ladera, para que esta se pueda aprovechar adecuadamente, de esta manera se pasó la cuenca y las líneas de drenaje como archivo KML a Google Earth, para así ubicar las terrazas por medio de los cambios de altura que se evidencian en la finca.

Por otro lado, para visualizar y conocer el tipo de suelo presente en la zona, se utilizó un mapa guía del tipo de suelos en Colombia y con el programa QGIS, al añadir el mapa de la finca como un archivo vectorial, se logró reconocer el tipo de suelo existente como arcilloso, arenoso o pedregoso (figura 4).

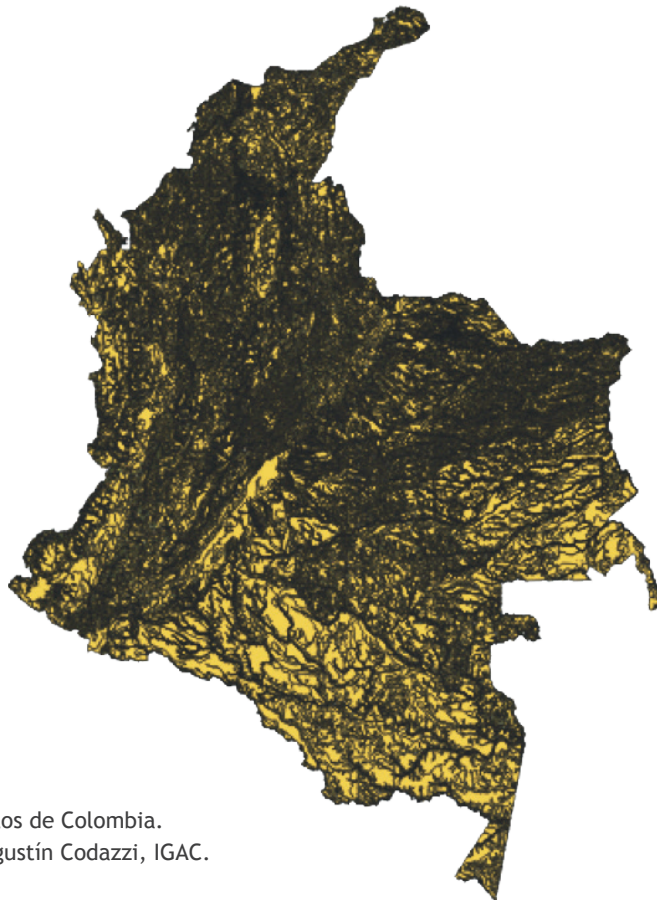


Figura 4. Mapa del tipo de suelos de Colombia.
Fuente: Instituto Geográfico Agustín Codazzi, IGAC.

Además, mediante la identificación de la tipología del suelo se determinó con base al [2], los índices más precisos respecto a la escorrentía e infiltración que se presentan en el tipo de suelo.

Por último, se evaluó cómo afecta la implantación de surcos y la siembra de árboles en la recarga de agua subterránea según los índices respectivos al suelo del terreno.

III. RESULTADOS

A. Evaluación de la cantidad de acopio de agua subterránea de la finca

Para una mejor obtención de los resultados, se organizó la información de precipitación y evaporación de estaciones IDEAM por cada mes, desde el año 1991 hasta el 2019, lo cual permitió comprender mejor los periodos de mayor o menor precipitación. Una vez pasados los promedios de precipitación y evaporación manualmente a Python, se ejecutó el programa para obtener una gráfica de comparación entre estos dos datos meteorológicos y la recarga de acuífero.

Por otra parte, para estimar la cantidad de agua subterránea en la zona se tuvo en cuenta el número de curva, parámetro que arroja un coeficiente de escorrentía e infiltración de acuerdo con el tipo de cobertura del terreno. En este caso, se reconoció que la finca dispone de una cobertura de tipo pastura, por lo cual se utilizó un coeficiente de infiltración de 0,32 y de escorrentía 0,68 correspondiente al tipo de cobertura presente en el área de estudio. En un principio, se utilizó un rendimiento del 100 % con una tasa de 0,32 que corresponde a la infiltración dada por pastura, los cuales al ser usados en el programa arrojaron un valor de recarga de acuífero de 2780,33 mm/año.

Regla de tres con el 32 %

$$\begin{aligned} 100\% &\rightarrow 7251,0285 \\ 32\% &\rightarrow 2320,33 \end{aligned}$$

Conjuntamente, se realizó el mismo procedimiento, se empleó un coeficiente de infiltración diferente, el cual fue 55 %, con el cual el rendimiento máximo fue de 3988,06 y de este modo, se obtiene una recarga acuífera de 2640,25 mm/año.

Regla de tres con el 55 %

$$\begin{aligned} 100\% &\rightarrow 7251,0285 \\ 55\% &\rightarrow 3988,06 \end{aligned}$$

B. Determinación de la tipología del suelo de la finca

Una vez implementada la metodología adecuada en QGIS con el mapa de suelos de Colombia del IGAC, el cual contiene la granulometría y el polígono de la finca, se determinó que la finca presenta un suelo de textura fina; esto significa que se trata de un suelo arcilloso (Grupo D), el cual presenta determinadas características físicas y químicas que se considerarán para poner en marcha los mecanismos y optimizar la captación de agua subterránea y superficial. (Ver figura 5)

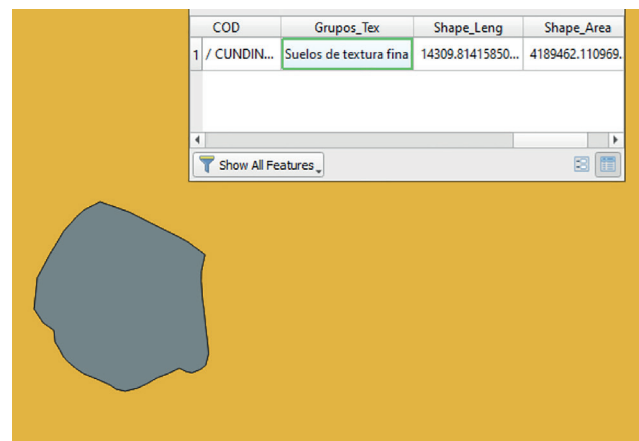


Figura 5. Tipología del suelo de la finca.
Fuente: elaboración propia con el software QGIS, 2020.

C. Cálculo del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)

Una vez realizado el cálculo del NDVI dentro del rango de -1 y 0, se logró caracterizar el agua subterránea y superficial de la zona (figura 6), mientras que con el rango de 0 y 1, se identificó la vegetación presente en el lugar (figura 7).

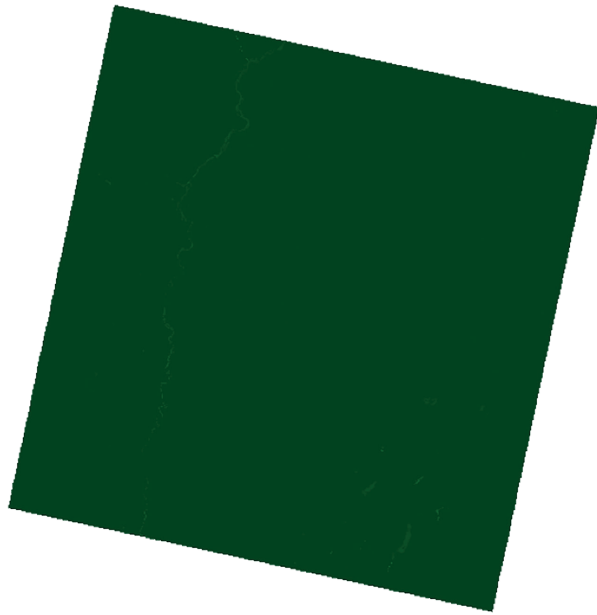


Figura 6. Leyenda del agua subterránea y superficial.
Fuente: elaboración propia con el software QGIS, 2020.

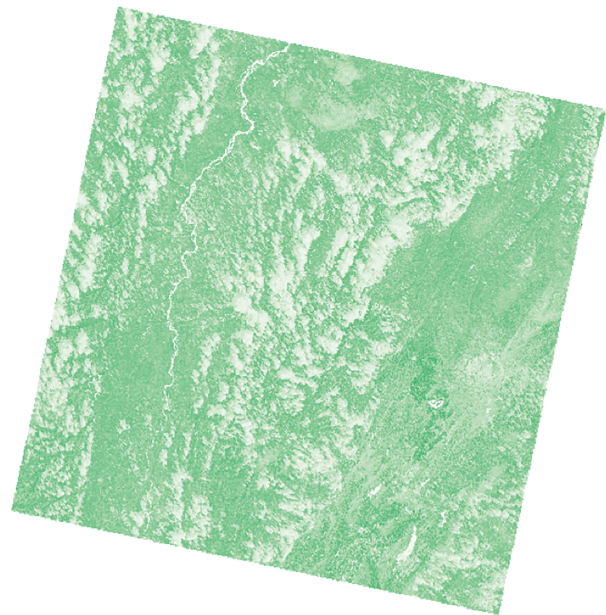


Figura 7. Leyenda de la vegetación.
Fuente: elaboración propia con el software QGIS, 2020.

Posteriormente, con la leyenda de agua subterránea y superficial se colocaron dos puntos referentes a los dos tipos de depósitos de agua que se lograron identificar en el área de estudio. Con la leyenda de

vegetación se colocaron dos puntos que presentan valores menores a 0.3, con el fin de identificar la vegetación pobre cercana a los depósitos de agua anteriormente señalados. (Ver figuras 8, 9, 10 y 11)

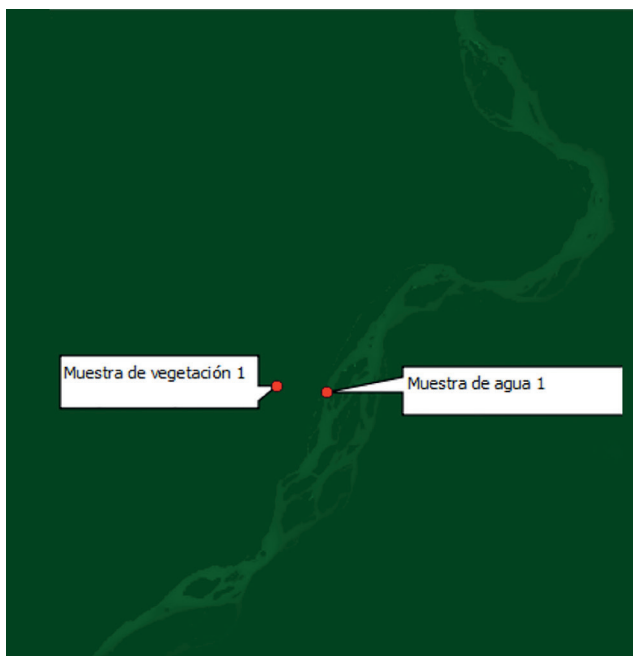


Figura 8. Muestra de agua número 1.
Fuente: elaboración propia con el software QGIS, 2020.

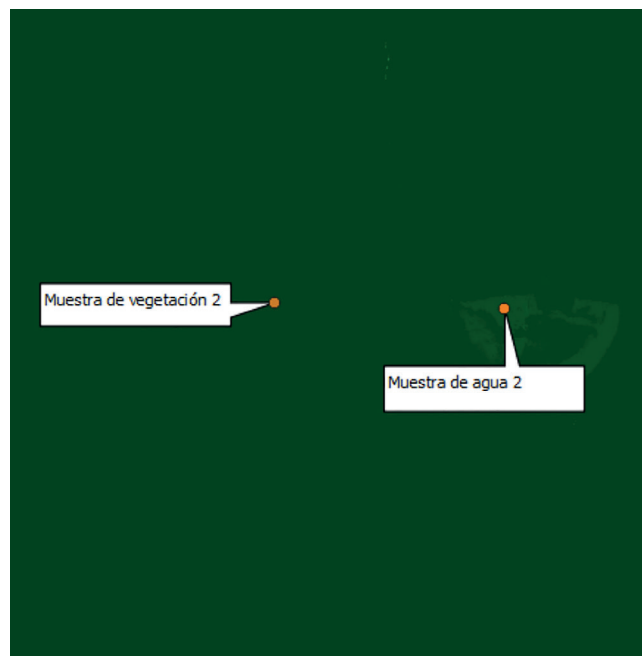


Figura 9. Muestra de agua número 2.
Fuente: elaboración propia con el software QGIS, 2020.

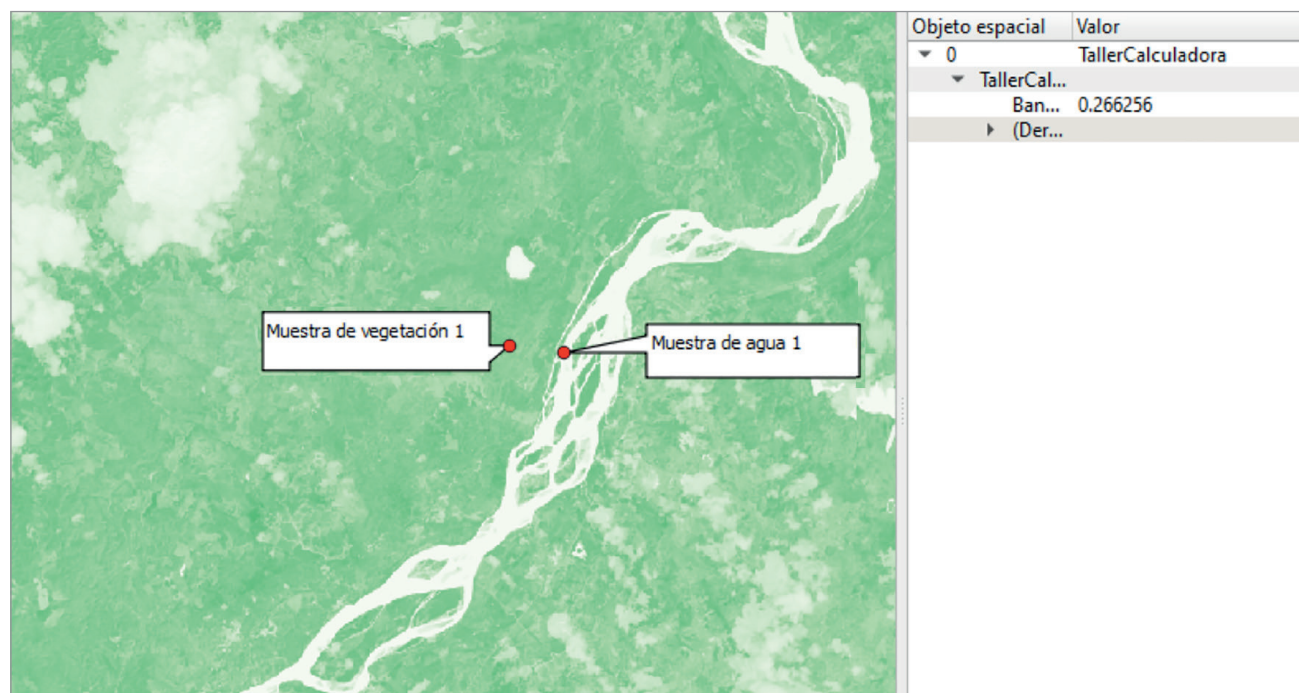


Figura 10. Muestra de vegetación número 1.
Fuente: elaboración propia con el software QGIS, 2020



Figura 11. Muestra de vegetación número 2.
Fuente: elaboración propia con el software QGIS, 2020.

D. Elección de la especie maderable para sembrar

Para mejorar la captación de agua subterránea, se sembrarán 350 semillas de la especie maderable *Tectona grandis* Linn F (figura 12). Esta especie se

eligió teniendo en cuenta sus características maderables y de captación de agua, además, gracias a una metodología empleada en un [2], el cual se basa en un estudio realizado sobre esta especie, se pudo determinar la cantidad de plantas que se van a sembrar en una determinada área de 0,56 hectáreas.



Figura 12. *Tectona grandis* Linn F.
Fuente: [2].

Regla de tres para cantidad de plantas

Plantas	Hectárea
625	→ 1 □□
350	→ 0,56 □□

E. Delimitación de la cuenca y del área de plantación

Para realizar la siembra adecuadamente, fue preciso conocer el comportamiento de la lluvia por medio de las líneas de drenaje (color rojo), con las cuales se realizó la delimitación de la cuenca en la

finca con el objetivo de reconocer y determinar en qué sector de la finca se puede obtener una mejor captación de agua. De esta manera, se obtuvo que una gran parte de la cuenca (color naranja) se encuentra dentro de la finca (color rosado) como se muestra en la figura 13, es decir, la zona de estudio presenta un área buena para ejecutar los mecanismos aptos para la captación de agua.

En este orden de ideas, se delimitó el área para la germinación de las plantas (color verde) con un terreno de 0,56 hectáreas, teniendo en cuenta los árboles (color amarillo) y el ganado (color morado) presentes en la zona de estudio, con el fin de tener listo y preparado el terreno para realizar la adecuada plantación con espacios de 4x4 m o 4x3 m. (Ver figura 14)

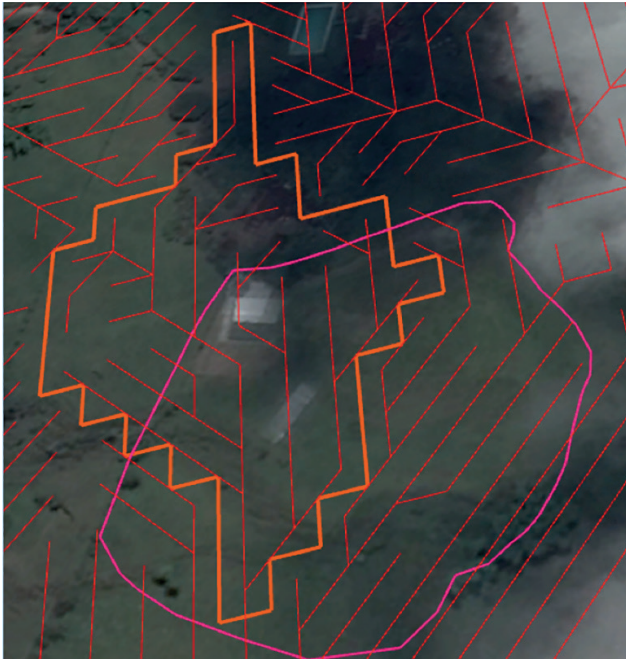


Figura 13. Delimitación de la cuenca en el área de estudio.
Fuente: elaboración propia en Google Earth, 2020.

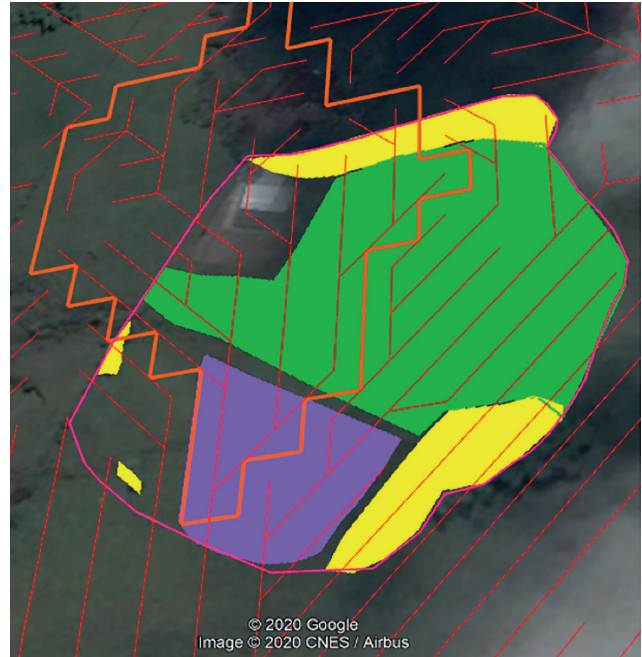


Figura 14. Área de plantación, de árboles y del ganado en la finca.
Fuente: elaboración propia en Google Earth, 2020.

F. Trazado de surcos en el área de plantación

La implementación de surcos (color amarillo) se ejecutará en el área de plantación junto con la siembra de la especie maderable como se muestra en la figura 15, con el fin de optimizar, con mayor eficiencia, la captación de agua en el área y de este modo, suministrar agua a los cultivos (color aguamarina) y a la laguna (color azul oscuro) presentes en la finca. En este aspecto, la laguna se alimentará por zanjas de infiltración y por la escorrentía del agua de lluvia, con lo cual se implementará un sistema integrado que permita el reciclaje de nutrientes conocido como VAC System.

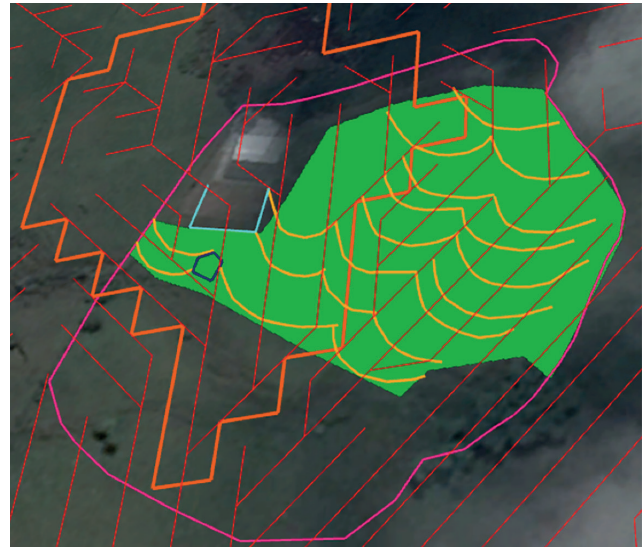


Figura 15. Simulación de los surcos.
Fuente: elaboración propia en Google Earth, 2020.

G. Estimación del agua aprovechable en distintos escenarios

Con el fin de simular la viabilidad de los dos métodos a implementar, los surcos y la plantación de la especie maderable, se realizó una tabla de Excel para comparar la eficacia de los sistemas, en el cual se calculó la recarga de agua

subterránea en litro de agua por metro cúbico considerando el tipo de suelo y el número de curva según la tipología de suelos del IGAC y la metodología del número de curva. (Ver Tabla 1)

Mes	Escurrimiento			Infiltración + Evapotranspiración			Método 1	Método 2
	Pastura con árboles pobre (86%)	Pastura con árboles buena (73%)	Surcos Literatura	Pastura con árboles pobre (14%)	Pastura con árboles buena (27%)	Surcos Literatura	Diferencia pastura árboles Buena - árboles mala	Diferencia surcos y pastura
Enero	3283773,756	2787389,351	1527336,631	534567,8207	1030952,226	2291004,946	496384,405	1260052,72
Febrero	3288523,636	2791421,226	1529545,877	535341,0571	1032443,467	2294318,816	497102,4102	1261875,349
Marzo	3288920,685	2791758,256	1529730,551	535405,693	1032568,122	2294595,827	497162,4292	1262027,705
Abril	3373547,522	2863592,664	1569091,871	549182,1547	1059137,013	2353637,806	509954,858	1294500,793
Mayo	3375400,826	2865165,817	1569953,872	549483,8553	1059718,864	2354930,809	510235,0085	1295211,945
Junio	3377113,153	2866619,304	1570750,304	549762,6062	1060256,455	2356125,455	510493,8487	1295869
Julio	3376206,954	2865850,089	1570328,816	549615,0855	1059971,951	2355493,223	510356,8651	1295521,273
Agosto	3370753,081	2861220,639	1567792,131	548727,2458	1058259,688	2351688,196	509532,4425	1293428,508
Septiembre	3280990,522	2785026,839	1526042,103	534114,7362	1030078,42	2289063,155	495963,6836	1258984,735
Octubre	3280777,782	2784846,257	1525943,155	534080,1041	1030011,629	2288914,732	495931,5252	1258903,103
Noviembre	3286378,332	2789600,212	1528548,062	534991,8216	1031769,942	2292822,092	496778,12	1261052,151
Diciembre	3285439,473	2788803,273	1528111,383	534838,984	1031475,183	2292167,074	496636,1994	1260691,891
Anual	39867825,72	33841293,93	18543174,75	6490111,164	12516642,96	27814762,13	6026531,795	15298119,17

Tabla 1. Captación de agua en litro por metro cúbico implementando surcos y la siembra de árboles
 Fuente: elaboración propia, 2020.

IV. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Con respecto a la recarga del acuífero que se puede tener en la finca San Felipe, se establece que esta permitió conocer la situación actual de la captación de agua que se puede obtener por la precipitación en la zona, gracias a la metodología implementada con las dos alternativas de rendimiento máximo. En el primer caso, se utilizó un rendimiento correspondiente al 100% que se considera un valor hipotético en condiciones ideales, debido a que toda el agua que proviene de la precipitación realmente no se puede recolectar subterráneamente. Esto sucede porque en condiciones reales, por diferentes factores del ambiente, un porcentaje se infiltra, otro se escurre y el restante se evapora, es decir, no todo el recurso hídrico se aprovecha y se acumula, porque no existe una infiltración total, que pueda acumular agua subterránea en un proceso natural [6].

En el segundo caso, se utilizó el método de curva, el cual estima la escorrentía generada por un episodio

de lluvia y se compone del 100 % que corresponde a la cantidad de agua generada por la precipitación y del 68 %, valor referente a la escorrentía; la resta de estos brinda el valor de 32% que indica el porcentaje de infiltración y evapotranspiración del recurso hídrico en el suelo. Lo anterior, se hizo con el fin de visualizar cómo el proceso hídrico cambia cuando se hace uso de otro rendimiento, por eso en el segundo caso se utiliza un valor correspondiente a 2320,33, que proviene del 32 % de lo que realmente se puede filtrar en la finca.

Además, considerando lo expuesto se realizaron dos procedimientos en los cuales se varió el coeficiente de infiltración y el rendimiento máximo, con el fin de comparar la cantidad de recarga de agua en el acuífero que se obtiene con dos tipos de cobertura diferente. Primero, se empleó el valor de infiltración de 0,32, dato correspondiente al suelo de la finca, porque esta presenta un suelo pobre con solamente una cobertura de pastura, lo que demuestra que por tener poca vegetación este no tiene la capacidad de almacenar una gran

cantidad de agua subterránea y arroja una recarga en el acuífero de 2069,82 mm/año. A diferencia del segundo procedimiento, donde se utilizó una infiltración de 0,55 y un rendimiento de 3988,06 mm/año, dato característico de una zona con alta vegetación, así pues, se genera una mayor recarga de agua subterránea de 2640,25 mm/año, lo que demuestra que la presencia de árboles permite una captación de gran cantidad de agua por medio de sus raíces.

Por otra parte, se realizó el cálculo del NDVI (índice de vegetación de diferencia organizada) con el objetivo de poder visualizar el terreno de la finca en las condiciones menos favorables en cuanto a la captación de agua subterránea y superficial, para poder hacer un análisis donde se recopile la relación de estas características hídricas con los puntos de drenaje y con la vegetación de la zona.

En este orden de ideas, en el área de estudio, según la figura 8 y figura 9, se puede concluir que existen dos clases de depósitos de agua. En la primera imagen se puede apreciar la primera clase, lo cual se considera como lugar de descarga de agua subterránea y tiene conectividad con la mayor parte del terreno. Es por este último factor, que es posible determinar que este punto pertenece a una quebrada, por lo tanto, se convierte en la principal vertiente a tener en cuenta en el momento de seleccionar una metodología como la implementación de terrazas, para así poder ejecutar el proceso contrario al flujo natural del agua, es decir, que el agua vaya de vertiente a ladera. En la figura 9, por el contrario, se logra identificar la segunda clase, que son las aguas estancadas, conocidas como lugares donde se conglomeran las aguas subterráneas y no tienen conectividad con el terreno de forma superficial. Por otro lado, se estima que cuando hay condiciones ambientales propicias, es decir con alta precipitación, es en este lugar donde se puede encontrar mayor probabilidad de agua superficial considerando que se trata de una zona árida, en la cual este tipo de comportamiento hídrico es muy poco visto.

Para el análisis adecuado de la vegetación presente en el territorio, se debe considerar que el proceso que se hizo con la ecuación 1 permitió el cálculo del índice de vegetación NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada), con el cual se puede estimar la condición de la vegetación de la zona, gracias a la medición de la intensidad de radiación que las plantas emiten o reflejan con las bandas de espectro electromagnético RED y

NIR [7]. Adicionalmente, estas bandas reflejan la abundancia de la vegetación con respecto a la acumulación de agua en sus hojas con los cambios de tonalidad de verde, por lo tanto, se puede inferir, según la figura 10 y figura 11, que, al presentar unas tonalidades de verde claro, en estos espacios, no se encuentra una abundancia grande a pesar de la cercanía a un depósito de agua. Asimismo, al depender la cantidad con la capacidad de acumulación de agua, se deduce que esta vegetación sufrió algún tipo de estrés, en este caso por el período de sequía, dado que el agua acaparada en las hojas de las plantas disminuyó y consecuentemente, su abundancia.

Por otra parte, cuando el NDVI arroja valores muy bajos del orden de 0.1, corresponden a áreas rocosas, arenosas o nevadas, mientras que si da valores de 0.2 a 0.3 pueden corresponder a áreas pobres con arbustos o pasturas naturales [8], de modo que este índice de vegetación no solo permite saber la cantidad y la calidad de la vegetación como se presentó anteriormente, sino también permite evaluar el desarrollo de la vegetación en la zona. En este sentido, teniendo en cuenta el valor de 0.266256 presente en las dos figuras 9 y 10, se puede concluir que el área de estudio corresponde a una zona pobre con presencia de vegetación de tipo pastoril y de arbustos, por lo cual, resulta difícil acumular agua subterránea de manera natural.

Consecuencia de lo mencionado, se plantea como alternativa la siembra de árboles, en especial de especies maderables, para así aumentar el NDVI (índice de vegetación de diferencia normalizada) y consecuentemente, almacenar una gran cantidad de agua subterránea que se evidenciará principalmente en el mes de mayo, dado que este es el mes más lluvioso en el lugar. De esta forma, se puede mantener este recurso en el subsuelo todo el año, debido a que esta zona experimenta unos periodos de sequía muy prolongados, así pues, esta alternativa sostenible, permitiría la formación de acuíferos de forma natural.

En este orden de ideas, la vegetación seleccionada es *Tectona grandis* Linn F, debido a que esta germina en lugares con temperaturas entre 22°C y 28°C y se encuentra a una altura entre los 0-800 msnm [2]. Esta requiere de mucha luz, por consiguiente, es propicia su siembra en este terreno, debido a que este lugar es un campo abierto. La finca abarca 1,1 Ha, lo cual permite que se destine 0,56 Ha solamente a la siembra de Teca, generando la posibilidad de colocar 350 plantas de esta especie,

quienes tendrán suficiente espacio con una distancia de 4x4 m entre ellas, para el crecimiento de cada una, asimismo con esta plantación daría aval al desarrollo de otra actividad económica, como el negocio de comercialización y venta de madera.

La Teca, nombre coloquial de esta especie, permite generar condiciones favorables en el terreno para la absorción de agua subterránea, debido a que la madera de este árbol provee una evapotranspiración mayor con respecto a otros, lo cual genera que su presencia en el suelo se base en hacer la función de refrigerador y este enfriamiento, principalmente en las raíces, genere que el agua subterránea aumente [9]. En el mes de mayo, mes con mayor precipitación, se puede recolectar mayor cantidad del recurso hídrico para los otros meses, que son los más secos, esto permite controlar la inundación y la sequía del lugar, es decir regular a su vez el ciclo hidrológico que se ha visto afectado por la masiva deforestación con intereses ganaderos que se ha ejecutado, y su consecuente cambio de la temperatura del suelo, producto de estar descubierto [9].

Adicionalmente para incrementar el agua subterránea, se plantea la implementación de surcos, a causa de que, como se ha visualizado a lo largo del análisis, la cobertura vegetal puede ser un factor altamente influyente, pero este sistema con el desarrollo de una metodología complementaria puede ser aún más eficaz, es por lo anterior que se habla de surcos de infiltración.

Los surcos son un método australiano, el cual consiste en que, por la acción de la gravedad, el agua fluya de vertiente a ladera, a través de unos espacios en el suelo, esto con el fin de maximizar la infiltración de agua en el subsuelo y restaurar los flujos naturales del agua [9]. De manera que en la figura 13 se muestra la delimitación de la cuenca dentro de la finca para identificar correctamente las vertientes de la finca e instaurar los surcos. Es relevante destacar que, mediante un análisis topográfico, estos surcos hacen que los árboles se rieguen por la acción de gravedad y el exceso de agua se aglomere de manera subterránea con cada precipitación, lo que permite la procreación de la madera, que es un negocio que se ubica en el tercer puesto a nivel mundial, como mayor generador de lucro, después del petróleo y el carbón [9].

Teniendo en cuenta las metodologías seleccionadas como la implementación de surcos y la plantación de especies maderables, se continuó con la

simulación de estas dentro del terreno de la finca. Para lo anterior, fue necesario saber de qué tipología era el suelo, con el fin de utilizar en la simulación los índices adecuados de escurrentía. Estos se obtuvieron considerando el suelo de tipo D en [10], el cual corresponde a un terreno de uso pastoril y de cultivo de árboles, dado que se plantea proseguir con la actividad económica del ganado, pero a su vez generar siembra de Teca. Es importante mencionar que el tipo D es un suelo arcilloso y que este dato se obtuvo a partir del mapa general de suelos de Colombia (figura 4), destacándose con esta tipología un alto índice de escurrimiento.

Acorde a lo expuesto se simuló la viabilidad en la recarga de la fuente hídrica entre surcos y árboles, por medio de la tabla 1. En donde, se muestra que solo la implementación de árboles duplica la recarga de agua con un valor de 12.516.642,96 *Litros de agua/m³*, en comparación a cuando se tiene en el terreno solo pastura, puesto que arroja el valor de 6.490.111,164 *Litros de agua/m³*. Esto sucede gracias a que se pasa de un porcentaje de infiltración del 14% y de 86% de escurrentía con cobertura de solo pastura a uno con 27% de infiltración y 73% de escurrentía con mayor cobertura de vegetación. Por otra parte, solo la instalación de surcos otorga un suministro de 27.814.762,13 *Litros de agua/m³*, valor muy por encima del dato que brinda solo la siembra de árboles mencionada.

Por este motivo, se pretende comparar las dos metodologías, la siembra de árboles e implementación de surcos con el objetivo de mostrar la equiparación en cuanto a la captación de agua, en este aspecto se observa que el primer método arroja un valor de 6.026.531,795 *Litros de agua/m³* en contraste con las terrazas, las cuales proporcionan un valor de 15.298.119,17 *Litros de agua/m³*, dicho de otra manera los surcos generan mayor recarga del acuífero respecto a la siembra de árboles, pero estas dos metodologías se pueden complementar para obtener mayor eficiencia en cuanto a la optimización de la captación de agua subterránea.

Las figuras 16 y 17 sustentan lo que se menciona en el párrafo anterior, pero de manera gráfica, exhibe que la pastura con buena cobertura de árboles genera una mayor infiltración, con el aumento de la recarga del acuífero de forma subterránea, respecto a la que no posee alta siembra de árboles; sin sobrepasar la alta recolección hídrica que generan los surcos de infiltración, pero que al combinarlos en el terreno se puede maximizar el agua subterránea a grandes rasgos.

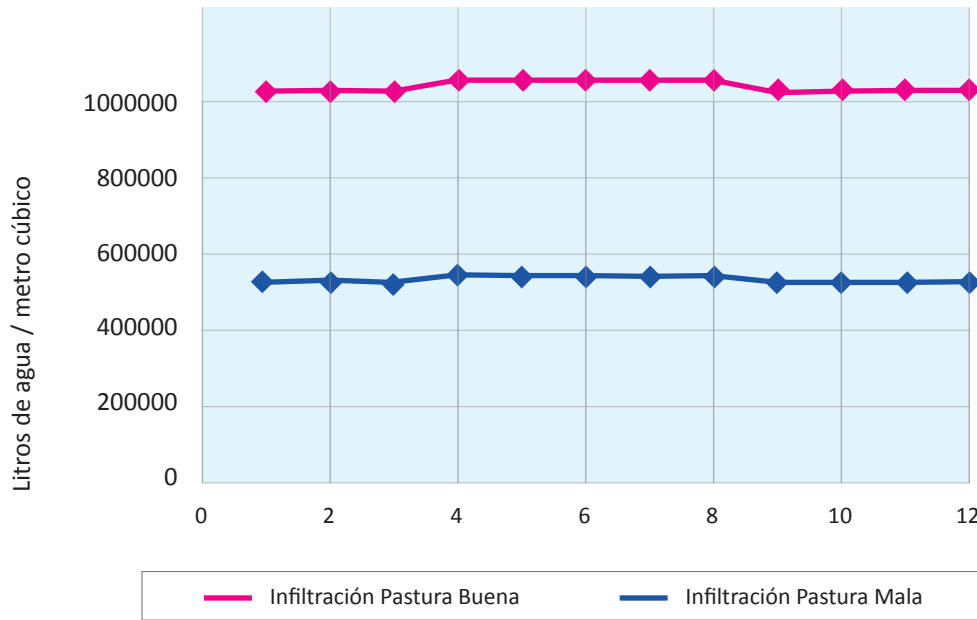


Figura 16. Gráfica que infiltración con una buena y mala cobertura de vegetación.
 Fuente: [10].

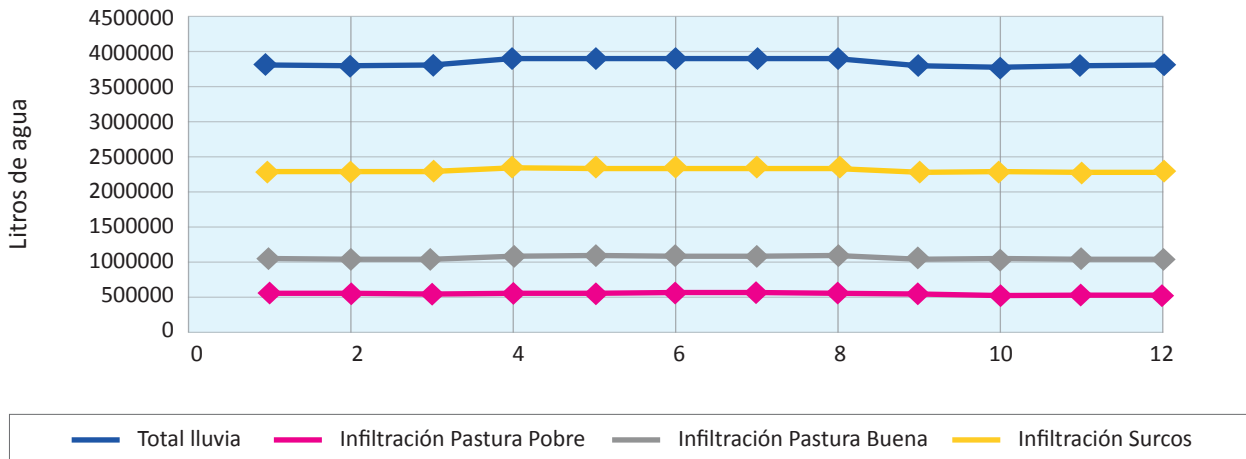


Fig. 17. Gráfica que infiltración en diferentes escenarios
 Fuente: [10].

Con respecto a lo anterior se propone un diseño que integre las metodologías indicadas y aporten al VAC System, tal como se muestra en la figura 18, en la cual se logra observar como la siembra de Teca en la parte superior de la montaña alimenta

la laguna de color azul, lugar donde se implementará dicho sistema, por acción de la gravedad, especialmente por los últimos surcos ubicados en la parte inferior de la finca. Estos son considerados sistemas de producción de alimento para animales,

altamente eficientes alrededor del mundo en términos de producción por unidad de área, asimismo su implementación se hace dentro del sector piscícola, ya que estos tienen como prioridad los peces antes que la agricultura y la ganadería, en vista de que el pez hace de puente entre los caminos energéticos y biológicos de estos dos factores [11].

En este sentido, el desarrollo de la ganadería resulta fundamental para llevar a cabo este sistema, dado que la cadena trófica que surge dentro de este empieza por el estiércol del ganado, ubicado en la

parte inferior de la finca (figura 18), el cual alimenta al fitoplancton y zooplancton que sustentan a los peces pequeños, de los cuales se proveen los peces grandes. De igual forma, los diferentes cultivos artesanales como la yuca, el plátano, la arracacha, entre otros, que se realizan durante todo el año, nutren junto con el estiércol al VAC System, lo que genera una producción de acuerdo con las distintas temporadas presentes en la finca, ya sea de lluvia o temporada seca, así como posibilita la organización de las actividades productivas según la época del año [11], [12].



Figura 18. Diseño de la propuesta del sistema de producción de *Tectona grandis* Linn F. (Teca).
Fuente: elaboración propia con apoyo de Google Earth, 2020.

V. CONCLUSIONES

La recarga del acuífero en la finca es mayor cuando se presenta una cobertura alta de árboles, ya que el valor que arroja de 12.516.642,96 *Litros de agua/m³* duplica la captación del recurso hídrico a diferencia de una cobertura netamente de pastura, el cual da un valor de 6.490.111,164 *Litros de agua/m³*.

El suelo de la finca es altamente arcilloso, lo cual hace que presente un alto índice de escurrimiento y un bajo porcentaje de infiltración, siendo así perjudicial para las actividades que se desarrollan en la finca, especialmente para la agricultura, porque demanda gran cantidad de agua para la siembra de cultivos.

La estimación del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) en la finca facilitó el reconocimiento del flujo natural del agua en la zona para la implementación de surcos, así como permitió evaluar la relación pertinente entre la captación de agua y el tipo de vegetación presente en esta.

Para mejorar la captación de agua subterránea con respecto a la vegetación, se optó por la siembra de la especie maderable, *Tectona grandis* Linn F, gracias a su capacidad de evapotranspiración y de enfriamiento en las raíces.

Adicionalmente esta da aval a la implementación de otra actividad económica en la finca como es la producción y comercio de madera.

Los surcos son un método más eficaz que la siembra de Teca, pero la implementación de estas dos metodologías conjuntas conlleva a tener una mayor eficiencia en la optimización de captación de agua subterránea.

La ejecución del VAC System como sistema integral de producción de alimento resulta altamente eficiente, puesto que propone el reciclaje de residuos que naturalmente produce la finca para utilizarlos como alimento en el sector piscícola, lo cual genera un beneficio económico y facilita la organización de las actividades productivas en la finca según la temporada y época del año.

VI. AGRADECIMIENTO

Al profesor Gonzalo Alberto Forero Buitrago, docente de la Universidad El Bosque por su apoyo en la elaboración del artículo, con su acompañamiento en la utilización de los aplicativos y el análisis de los resultados que estos suministraron.

REFERENCIAS

- [1] W. Fonseca González, “Índice General Contenido Capítulo 1. Botánica y ecología”, *Manual para productores de Teca (Tectona grandis L. f) en Costa Rica*, p. 1, 2004.
- [2] M. Vinueza. (2012). “Ecuador forestal. Ficha técnica de especies maderables. Ficha Técnica No 1: TECA”. [En línea]. Disponible en: <https://ecuadorforestal.org/fichas-tecnicas-de-especies-forestales/ficha-tecnica-no-1-teca/>.
- [3] Ideam, Sistema de Monitoreo de Bosques y Carbono. (2010). “Cambio de la Superficie Cubierta por Bosque Natural (Desagregación)”. [En línea]. Disponible en: <http://smbyc.ideam.gov.co/MonitoreoBC-WEB/reg/indexLogOn.jsp>.
- [4] G. A. Forero Buitrago, “Dimensionamiento de embalses para fincas en Colombia usando como herramienta los modelos de elevación digital”, *Revista de Tecnología*, vol. 15, no. 1, p. 137, 2017, DOI: <https://doi.org/10.18270/rt.v15i1.2044>
- [5] G. A. Forero Buitrago, J. C. Ramírez Barreto, y G. A. Ramírez Feo, “Propuesta de almacenamiento de agua lluvia para suministrarla al municipio de Albán utilizando HEC-GeoHMS”, *Revista Avances: Investigación en Ingeniería*, vol. 17, no. 1, pp. 14-15, 2020, DOI: <https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.1.6031>
- [6] E. Grass, Cosecha de agua y tierra, diseño con permacultura y Key line, vol. 1. *México: COAS Editores*, p. 198, 2009.

- [7] J. Díaz, “Estudio de Índices de vegetación a partir de imágenes aéreas tomadas desde UAS/RPAS y aplicaciones de estos a la agricultura de precisión”, *Univ. Complut. Madrid*, p. 77, 2015.
- [8] P. Muñoz Aguayo, “Apuntes de Teledetección: Índices de vegetación,” *Centro de Información de Recursos Naturales*, p. 4, 2013.
- [9] G. A. Forero Buitrago, “La madera Colombiana, oportunidad de regeneración del flujo de los ríos mediante una producción sostenible y competitiva”, *Revista de tecnología*, vol. 15, no. 2, pp. 103-114, 2016, DOI: <https://doi.org/10.18270/rt.v15i2.2179>
- [10] L. Mays, *Water Resources Engineering*, Vol 3. United States: Wiley, 2019.
- [11] G. A. Forero Buitrago, “Integrated farming system for the foothill-regions of Colombia - Ariporo System (A. S.) Un sistema de agricultura integral para la región del piedemonte”, *Revista de Tecnología*, vol. 12, no. 2, p. 31, 2013, DOI: <https://doi.org/10.18270/rt.v12i2.697>.
- [12] C. Machado, *Ingeniería de la Investigación Universidad del Bosque*, vol. 4, 2013.