

Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano
Departamento de Ambiente y Desarrollo
Ingeniería en Ambiente y Desarrollo



Proyecto Especial de Graduación

**Efecto de la restauración forestal en la humedad del suelo en cuatro
microcuencas afectadas por Gorgojo Descortezador de Pino (*Dendroctonus
frontalis*) en Honduras**

Estudiante

Fernando José Mendoza Martínez

Asesores

Josué Aníbal León Carvajal, Mtr.

José Fernando Tercero Iglesias, M.Sc.

Alexandra Maribel Manueles Lorenzo, Mtr.

Honduras, agosto 2023

Autoridades

SERGIO ANDRÉS RODRÍGUEZ ROYO

Rector

ANA M. MAIER ACOSTA

Vicepresidenta y Decana Académica

ERIKA TENORIO MONCADA

Directora Departamento Ambiente y Desarrollo

HUGO ZAVALA MEMBREÑO

Secretario General

Agradecimientos

Quiero expresar mi profundo agradecimiento por el apoyo brindado durante el desarrollo de esta investigación, la cual fue posible gracias al proyecto BID 3878/BL y HO-L1200/HO-G1252 del Banco Interamericano de Desarrollo (BID) y del Instituto Nacional de Conservación Forestal, Áreas Protegidas y Vida Silvestre (ICF); así como también al técnico de campo encargado del proyecto, Ingeniero Oscar Fuentes, por facilitar los datos e información utilizados en el estudio. Además, me gustaría agradecer al Ingeniero Félix Mancía y a Duslin Ortega por su apoyo durante las salidas de campo para la toma de datos. Su contribución fue fundamental para el éxito de este trabajo.

Contenido

Agradecimientos	3
Contenido.....	4
Índice de Cuadros.....	6
Índice de Figuras	8
Índice de Anexos	10
Resumen	12
Abstract.....	13
Introducción.....	14
Metodología.....	17
Área de Estudio.....	17
Diseño de Estudio	18
Análisis de Cuencas Pareadas	18
Selección de Microcuencas.....	19
Microcuencas de Tratamiento.....	20
Microcuencas de Control.....	22
Caracterización Biofísica de las Microcuencas.....	24
Parámetros Morfométricos e Hidrológicos	24
Caracterización de Tipo de Suelo.....	26
Caracterización de Usos en las Microcuencas	26
Evaluación de Humedad de Suelo en las Microcuencas.....	28
Recolección de Datos.....	28
Instrumentos Hidrometeorológicos de Medición	29
Análisis de Datos.....	29
Resultados y Discusión.....	31

Caracterización Biofísica de las Microcuencas.....	31
Parámetros Morfométricos e Hidrológicos	31
Pendientes de las Microcuencas.....	34
Caracterización de Tipo de Suelo de las Microcuencas	38
Caracterización de Cobertura en las Microcuencas.....	43
Retención de Humedad en el Suelo.....	56
Comparación de Humedad de Suelo en Microcuencas	66
Conclusiones	70
Recomendaciones.....	71
Referencias.....	72
Anexos.....	76

Índice de Cuadros

Cuadro 1 Variables para la clasificación de los pares de microcuencas.	20
Cuadro 2 Parámetros morfométricos de las microcuencas Quebrada del Plan y Quebrada Cupiles de Quiles	32
Cuadro 3 Parámetros morfométricos de las microcuencas El Coyolito y Las Guamas.....	34
Cuadro 4 Rango de pendientes de las microcuencas quebradas del Plan y Cupiles de Quiles	36
Cuadro 5 Rango de pendientes de las microcuencas de estudio quebradas El Coyolito y Las Guamas	38
Cuadro 6 Tipo de suelo de las microcuencas quebradas del Plan y Cupiles de Quiles.....	40
Cuadro 7 Tipo de suelo de las microcuencas quebradas El Coyolito y Las Guamas	42
Cuadro 8 Resultados de laboratorio de suelos en los puntos de instalación de los sensores.....	43
Cuadro 9 Comparación de usos y coberturas de las microcuencas quebradas del Plan y Cupiles de Quiles	45
Cuadro 10 Comparación de usos y coberturas de las microcuencas quebradas El Coyolito y Las Guamas	48
Cuadro 11 Área plagada y restaurada de las microcuencas quebradas del Plan y Cupiles de Quiles ..	50
Cuadro 12 Área plagada y restaurada de las microcuencas quebradas El Coyolito y Las Guamas	52
Cuadro 13 Comparación de usos y coberturas mediante muestras in situ en la parte baja y alta de las microcuencas del Plan y Cupiles de Quiles	53
Cuadro 14 Comparación de usos y coberturas mediante muestras in situ en la parte baja y alta de las microcuencas El Coyolito y Las Guamas	55
Cuadro 15 Análisis de Varianza de la parte baja y alta del área afectada de las microcuencas quebrada del Plan y quebrada Cupiles de Quiles.....	67
Cuadro 16 Comparación de la parte baja y alta del área afectada de las microcuencas quebrada del Plan y quebrada Cupiles de Quiles.....	67

Cuadro 17 Análisis de Varianza de la parte baja y alta del área afectada de las microcuencas quebrada El Coyolito y Las Guamas	69
Cuadro 18 Comparación de la parte baja y alta del área afectada de las microcuencas quebradas El Coyolito y Las Guamas	69

Índice de Figuras

Figura 1 Ubicación de las microcuencas de estudio en el mapa departamental de Honduras.....	17
Figura 2 Quebrada del Plan, Bosque Escolar UNACIFOR (tratamiento)	21
Figura 3 Quebrada El Coyolito (tratamiento).....	22
Figura 4 Quebrada Cupiles de Quiles (control).....	23
Figura 5 Quebrada Las Guamas (control)	23
Figura 6 Método de parcelas anidadas para caracterización in situ para las microcuencas.....	28
Figura 7 Mapa de pendientes de la microcuenca quebrada del Plan.....	35
Figura 8 Mapa de pendientes de la microcuenca quebrada Cupiles de Quiles.....	36
Figura 9 Mapa de pendientes de la microcuenca quebrada Coyolito	37
Figura 10 Mapa de pendientes de la microcuenca quebrada Las Guamas	38
Figura 11 Mapa de tipo de suelo de la microcuenca quebrada Cupiles de Quiles	39
Figura 12 Mapa de tipo de suelo de la microcuenca quebrada Coyolito	41
Figura 13 Mapa de tipo de suelo de la microcuenca quebrada Las Guamas	41
Figura 14 Mapa de Usos y Coberturas de la microcuenca quebrada del Plan	44
Figura 15 Mapa de Usos y Coberturas de la microcuenca quebrada Cupiles de Quiles.....	45
Figura 16 Mapa de Usos y Coberturas de la microcuenca quebrada Coyolito.....	47
Figura 17 Mapa de Usos y Coberturas de la microcuenca quebrada Las Guamas	47
Figura 18 Zonificación y área de tratamiento de plantación forestal en la microcuenca quebrada del Plan	49
Figura 19 Zonificación y área por regeneración natural en la microcuenca quebrada Cupiles de Quiles	49
Figura 20 Zonificación y área de tratamiento de plantación forestal en la microcuenca quebrada El Coyolito	51
Figura 21 Zonificación y área por regeneración natural en la microcuenca quebrada Las Guamas	51

Figura 22 Evolución en la retención de la humedad de suelo de la microcuenca quebrada del Plan..	57
Figura 23 Evolución en la retención de la humedad de suelo de la microcuenca quebrada Cupiles de Quiles	58
Figura 24 Evolución en la retención de la humedad de suelo en la parte baja de la microcuenca Q. del Plan y Q. Cupiles de Quiles.....	59
Figura 25 Evolución en la retención de la humedad de suelo en la parte alta de la microcuenca Q. del Plan y Q. Cupiles de Quiles.....	60
Figura 26 Evolución en la retención de la humedad de suelo de la microcuenca quebrada El Coyolito	62
Figura 27 Evolución en la retención de la humedad de suelo de la microcuenca quebrada Las Guamas	63
Figura 28 Evolución en la retención de la humedad de suelo en la parte baja de la microcuenca El Coyolito y Las Guamas	64
Figura 29 Evolución en la retención de la humedad de suelo en la parte alta de la microcuenca El Coyolito y Las Guamas	65

Índice de Anexos

Anexo A Sensor de Temperatura y Humedad del Suelo: HOBO EC5 Soil Moisture.....	76
Anexo B Pluviómetro métrico: RainGauge 0.2 mm with pendant RG3-M.	77
Anexo C Grabador de Datos y Software HOBO Waterproof Shuttle.	78
Anexo D Sensor de presión atmosférica sobre el caudal: HOBO Water Level (13 ft) Data Logger - U20L-04	79
Anexo E Caracterización de vegetación por parcelas anidades en parte baja de la microcuenca quebrada del Plan	80
Anexo F Cobertura presente en la parte baja de la quebrada del Plan.....	81
Anexo G Caracterización de cobertura vegetal menor en parcelas de 1×1 m en la parte alta de la quebrada del Plan	82
Anexo H Cobertura presente en la parte alta de la quebrada del Plan	83
Anexo I Pinos bajo plantación en la quebrada del Plan.....	84
Anexo J Medición de caudal en la quebrada del Plan.....	85
Anexo K Sensor de caudal en la quebrada del Plan.....	86
Anexo L Estación grabadora de datos y precipitación en la quebrada del Plan	87
Anexo M Caracterización de vegetación por parcelas anidades en parte baja de la microcuenca quebrada Cupiles de Quiles	88
Anexo N Medición de brinzales en la parte baja de la quebrada Cupiles de Quiles	89
Anexo O Cobertura presente en la parte baja de la quebrada Cupiles de Quiles	90
Anexo P Caracterización de vegetación por parcelas anidades en parte alta de la microcuenca quebrada Cupiles de Quiles	91
Anexo Q Cobertura presente en la parte alta de la quebrada Cupiles de Quiles.....	92
Anexo R Caracterización de vegetación por parcelas anidades en parte baja de la microcuenca quebrada El Coyolito.....	93

Anexo S Cobertura presente en la parte baja de la quebrada El Coyolito.....	94
Anexo T Caracterización de cobertura vegetal menor en parcelas de 1×1 m en la parte alta de la quebrada El Coyolito.....	95
Anexo U Sensor de humedad de suelo en la parte alta de la quebrada El Coyolito.....	96
Anexo V Cobertura presente en el área del sensor de humedad de suelo y afectada por incendios en la parte alta de la quebrada El Coyolito.....	97
Anexo W Cobertura presente en el área bajo plantación afectada por el gorgojo y los incendios en la parte alta de la quebrada El Coyolito.....	98
Anexo X Pinos bajo plantación afectados por incendios en la quebrada El Coyolito.....	99
Anexo Y Sensor de caudal instalado en la quebrada El Coyolito.....	100
Anexo Z Estación grabadora de datos y precipitación en la quebrada El Coyolito.....	101
Anexo AA Caracterización de vegetación por parcelas anidades en parte baja de la microcuenca quebrada Las Guamas.....	102
Anexo BB Caracterización de cobertura vegetal menor en parcelas de 1×1 m en la parte baja de la quebrada Las Guamas.....	103
Anexo CC Cobertura presente en la parte baja de la quebrada Las Guamas.....	104
Anexo DD Caracterización de vegetación por parcelas anidades en parte alta de la microcuenca quebrada Las Guamas.....	105
Anexo EE Caracterización de cobertura vegetal menor en parcelas de 1×1 m en la parte alta de la quebrada Las Guamas.....	106
Anexo FF Medición de pinos bajo regeneración natural en la parte alta de la quebrada Las Guamas.....	107
Anexo GG Cobertura presente en la parte baja de la Q. Las Guamas.....	108
Anexo HH Estación grabadora de datos y precipitación en la quebrada Las Guamas.....	109

Resumen

En Honduras, la plaga del gorgojo descortezador de pino (*Dendroctonus frontalis*) ha destruido vastas áreas de bosques de pino, afectando el ciclo hidrológico de las microcuencas; en consecuencia, se han realizado prácticas de reforestación para regenerar las áreas boscosas más afectadas. Por lo tanto, se evaluó el efecto de la restauración forestal en la humedad del suelo de cuatro microcuencas afectadas por la plaga del gorgojo, siendo del Plan y El Coyolito las que se encuentran bajo reforestación de pino, y Cupiles de Quiles y Las Guamas bajo regeneración natural. Estas se analizaron mediante el método de cuencas pareadas, agrupándolas en dos pares. Se recolectaron datos de humedad de suelo utilizando sensores desde marzo de 2022 hasta mayo de 2023. Asimismo, se aplicó el modelo Lineal Generalizado Mixto en función de la humedad de suelo, utilizando el tipo de cobertura, la precipitación y temperatura como covariables. Las cuatro microcuencas poseen una forma oblonga y una textura franco arenoso, influyendo en un mayor tiempo de concentración hídrica y retención baja-moderada; además, una cobertura dominante de bosque de pino; aunque, el segundo par presentó diferencias en la proporción del área plagada. La microcuenca de control bajo regeneración natural, Cupiles de Quiles, retiene mayor humedad que la microcuenca del Plan bajo tratamiento por plantación. Por otro lado, la microcuenca El Coyolito bajo tratamiento y Las Guamas bajo regeneración natural, mostraron una retención de humedad muy similar. Ambos resultados pueden ser asociados con la cantidad de vegetación presente en las microcuencas.

Palabras clave: Cuencas pareadas, disponibilidad de agua, plantación forestal, retención de agua por el suelo

Abstract

The pine bark beetle (*Dendroctonus frontalis*) has caused extensive damage to the pine forests in Honduras, disrupting the hydrological cycle of the micro-watersheds. To counter this, reforestation efforts have been carried out to restore the affected areas. Therefore, the effect of forest restoration on soil moisture was evaluated in four micro-watersheds affected by the pine bark beetle. Two of the micro-watersheds, del Plan and El Coyolito, are undergoing reforestation, while Cupiles de Quiles and Las Guamas undergoing natural regeneration. They were analyzed using the paired-watershed method and grouped into two pairs. Soil moisture data were collected using sensors from March 2022 to May 2023. The Generalized Linear Mixed Model was also applied using soil moisture as the response variable, with vegetation type, precipitation, and temperature as covariates. The four micro-watersheds have an oblong shape and a sandy loam texture, influencing a longer time of water concentration and low-moderate retention; in addition, a dominant pine forest cover; however, the second pair presented differences in the proportion of the plagued area. The control micro-watershed under natural regeneration, Cupiles de Quiles, showed higher soil moisture retention than the Plan micro-watershed under plantation treatment. On the other hand, the El Coyolito micro-watershed under treatment and Las Guamas under natural regeneration showed very similar moisture retention. Both results can be associated with the amount of vegetation present in the micro-watersheds.

Keywords: Forest plantations, paired watershed, soil water retention, water yield R

Introducción

El cambio climático es una problemática que tendrá impactos negativos en la dinámica global; sin embargo, ya se pueden observar variaciones en los patrones del clima, provocando alteraciones ambientales como un incremento en los incendios forestales, plagas y enfermedades. Las áreas boscosas de Honduras se encuentran continuamente expuestas ante este tipo de amenazas y han experimentado estas situaciones en años anteriores.

Actualmente, Instituto Nacional de Estadística Honduras [INE] (2019) indica que el área forestal de Honduras representa un aproximado del 50% del total del territorio (5.4 millones de ha), del cual un 36.6% (1.9 millones de ha) pertenecen a bosques de conífera o pino. Además, indican que un 5.3% (0.3 millones de ha) pertenecen a bosques mixtos, los cuales están constituidos por especies de latifoliadas y de coníferas. Estos bosques mixtos están ubicados en la región centro oriental y occidental del país.

Los bosques de coníferas y mixtos han sido afectados principalmente por la plaga del gorgojo descortezador (*Dendroctonus frontalis*). Esto provocó que, para diciembre de 2016, un aproximado de 511,000 ha fueran afectadas en todo el país (Instituto Nacional de Conservación Forestal, Áreas Protegidas y Vida Silvestre [ICF], 2017). El ataque del gorgojo descortezador presenta una grave amenaza hacia muchas microcuencas de Honduras. Esta causa que los sistemas hídricos y el suministro de agua de estas zonas se vea deteriorada severamente, poniendo a las poblaciones cercanas en riesgo.

El gorgojo afecta directamente la cobertura vegetal presente, por lo que, influye en la captación de agua y recarga hídrica de las microcuencas (Comisionado Nacional de los Derechos Humanos [CONADEH], 2016). Además, en una investigación realizada en Canadá, se demostró que los bosques de ese país presentaron efectos negativos en el aprovisionamiento de agua causado por brotes de una plaga similar (*Dendroctonus ponderosae*) (Dhar et al., 2016). La pérdida de las zonas de bosques de pino tiene muchos impactos negativos en los ecosistemas. Uno de ellos es la alteración

del ciclo hidrológico en las microcuencas afectadas. Dhar et al. (2016), Ladekarl et al. (2001) y Penn et al. (2016) evaluaron los efectos que tiene una plaga similar de gorgojo descortezador en el rendimiento hídrico de distintas cuencas conformadas por pinos.

La evapotranspiración se ve influenciada por los cambios en la cobertura vegetal y en el uso de suelos (Sun et al., 2008; Yang et al., 2012); presentando impactos tanto en la humedad del suelo debido a la evaporación directa, como en la transpiración vegetal (Córdoba-González, 2021). Asimismo, Ladekarl et al. (2001), demuestran en su investigación que existen cambios en la humedad de suelo y que existe una transición de transpiración por evaporación, en cuencas que han sido afectadas por la plaga; incluso menciona que estos cambios se mantienen años posteriores a los ataques.

Para poder frenar la expansión del gorgojo descortezador existen varios métodos. Uno de estos consiste en una tala completa del área afectada, dejándola sin cobertura vegetal, y en otros casos un corte completo, pero manteniendo algo de cobertura o simplemente un corte alrededor de la zona afectada (Thunes et al., 2005). Para recuperar la cobertura de pinos, en algunos casos se establecen plantaciones forestales inducidas y en otros se mantiene una regeneración natural de las zonas. De esta forma, durante la regeneración natural se presentan lo que son principalmente plántulas jóvenes, latizales y brinzales (Gómez, 2011).

Estas formas de restauración pueden implicar distintas respuestas hidrológicas. En su investigación, Jobbágy et al. (2013) indican que a partir del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) del sensor Espectrorradiómetro de Imágenes de Resolución Moderada (MODIS) “existe una productividad primaria y evaporación mayor y más estable en plantaciones forestales que en pastizales” (p. 87). Barrantes y Méndez (2016), demuestran que en suelos donde predomina la presencia de matorrales se presenta una mayor densidad de nacientes de agua y una mayor densidad de aforo, que, en suelos con cobertura de bosque secundario, potreros y bosques de cipreses.

Los recursos hídricos son muy importantes para el desarrollo y la sostenibilidad de las sociedades. Sin embargo, la disponibilidad de este recurso se ve amenazada ante su uso excesivo,

problemas en cuanto a su generación en los ecosistemas y cambios en la dinámica climática. Por lo que, es necesario implementar métodos que ayuden a evaluar el estado del hídrico en las cuencas, con el fin de realizar una buena gestión de este vital recurso.

Mejía (2022) indica que es necesario recurrir al uso de metodologías que permitan evaluar el desempeño de las prácticas de restauración forestal ante la recuperación del ciclo hidrológico en microcuencas afectadas por la plaga del gorgojo descortezador de pino. Principalmente a través del análisis de la recarga hídrica por medio de la retención de agua en el suelo y la respuesta en caudal. Para ello se utilizará el método de cuencas pareadas, para analizar los aspectos hidrológicos de las microcuencas.

El presente estudio y la investigación de Mejía (2022) se desarrollaron en el marco de los proyectos del BID 3878/BL-HO y HO-L1200/HO-G1252. El objetivo de estos proyectos es la restauración de los bosques afectados por la plaga del gorgojo descortezador, implementando un manejo forestal adaptativo y reforzando las capacidades técnico-científicas. En este sentido, este estudio continuó la investigación de Mejía (2022), haciendo énfasis en el análisis de humedad del suelo a lo largo de un año de estudio. Por este motivo esta investigación evaluó el efecto de la restauración forestal en la humedad del suelo en cuatro microcuencas afectadas por el Gorgojo de Pino (*D. frontalis*). Para ello, se establecieron los siguientes objetivos específicos: 1) Describir las características biofísicas de las microcuencas quebradas del Plan y El Coyolito (en proceso de restauración mediante plantación forestal) y las microcuencas quebradas Cupiles de Quiles y Las Guamas (bajo regeneración natural) y 2) Evaluar el efecto de la plantación forestal en las microcuencas del Plan y El Coyolito y de la regeneración natural en las microcuencas Cupiles de Quiles y Las Guamas en la retención de humedad de suelo.

Metodología

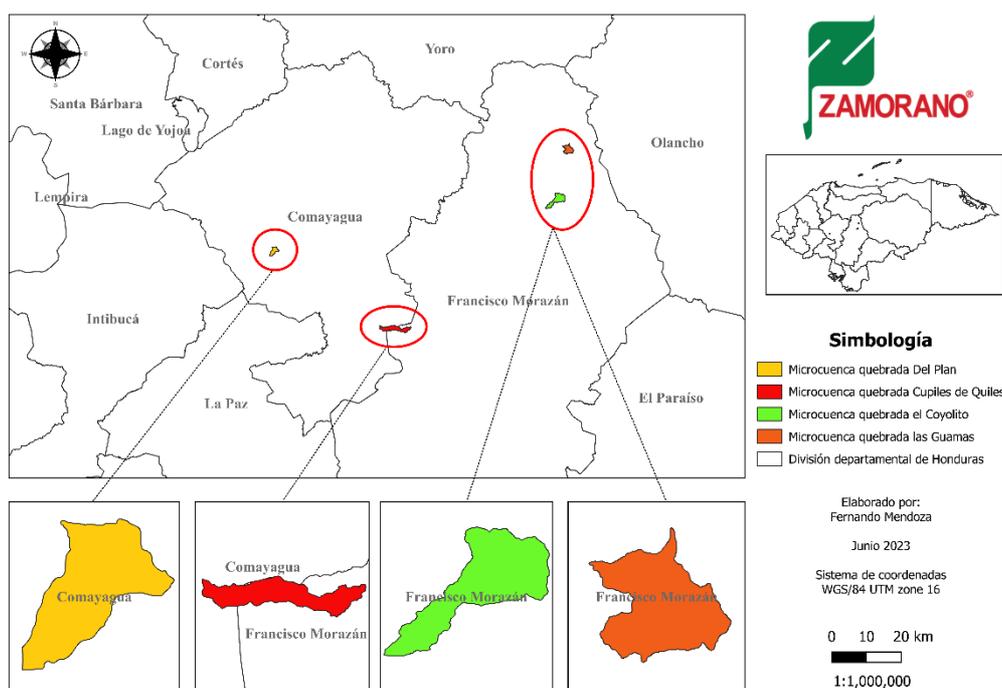
Área de Estudio

El área de estudio se constituyó de cuatro microcuencas ubicadas en la región central de Honduras, específicamente en los departamentos de Francisco Morazán y Comayagua. La microcuenca quebrada del Plan se localiza en el municipio de Siguatepeque, y es el Bosque Escolar de la Universidad Nacional de Ciencias Forestales (UNACIFOR), departamento de Comayagua y la microcuenca quebrada El Coyolito está ubicada en el municipio de San Ignacio en el departamento de Francisco Morazán (Figura 1). Ambas se encuentran bajo restauración a través de reforestación por plantación con especie de *Pinus oocarpa*.

Por otro lado, la microcuenca quebrada Cupiles de Quiles, se ubica en las comunidades de Las Moras y San Francisco de Soroguara, municipio del Distrito Central en el departamento de Francisco Morazán (Figura 1). La microcuenca quebrada Las Guamas se localiza en el municipio de Orica en el departamento de Francisco Morazán (Figura 1). Ambas están bajo regeneración natural.

Figura 1

Ubicación de las microcuencas de estudio en el mapa departamental de Honduras



Diseño de Estudio

En este estudio se implementó parte de la metodología utilizada por Mejía (2022), principalmente en el método de cuencas pareadas, la caracterización de microcuencas y el método de medición de humedad del suelo; dándole continuidad a los datos recolectados en su investigación. Esta consiste en un análisis de cuencas pareadas, mediante la selección previa de un universo de microcuencas en tratamiento y sin tratamiento, para evaluar el cambio en la disponibilidad de agua por cobertura vegetal, por medio de la evaluación de la humedad de suelo. Además, se analizó los datos de caudal como punto de partida para una evaluación futura sobre posibles cambios en este, en donde se medirá la salida en las microcuencas seleccionadas. Martínez et al. (2017) y Ray et al. (2019) utilizan esta metodología para analizar el comportamiento hídrico, tanto humedad de suelo como caudal hídrico, en relación con distintas coberturas vegetales en distintos pares de cuencas.

El alcance de esta investigación es correlacional, ya que se evaluó el efecto que tiene las distintas coberturas vegetales (reforestación y regeneración natural), la precipitación y la temperatura en la humedad de suelo de microcuencas afectadas por la plaga del gorgojo descortezador. El estudio tiene un diseño cuasiexperimental. Además, los datos fueron recolectados a lo largo de 1 año y 3 meses, posteriormente comparados con los datos de un estudio previo, y por ende el estudio es de tipo longitudinal.

Análisis de Cuencas Pareadas

Para esta investigación se hizo uso del análisis de cuencas pareadas. Este consiste en la evaluación de una o más variables de forma simultánea de dos microcuencas, una de ellas bajo tratamiento de reforestación inducida y otra con regeneración natural. Se evaluó la humedad del suelo mediante sensores de humedad en la parte alta y baja del área afectada de las microcuencas. Por su parte, Loftis et al. (2001) demuestran que utilizar un análisis de cuencas pareadas tiene un mayor efecto de detectar cambios mínimos en la respuesta hidrológica en comparación a un estudio con una sola cuenca. También, en la investigación Loftis et al. (2001) definen que los cambios

detectados dependerán de la fuerza de correlación entre las variables de interés en la cuenca en tratamiento y su correspondiente en la cuenca control.

Este método permite comparar la respuesta en la humedad del suelo en ambos tratamientos, analizando los factores que pueden influir. De igual forma, se evaluó la respuesta en el caudal de salida por ser el segundo año de tratamiento, tomando en cuenta los factores de humedad y precipitación principalmente. Tal como lo demuestra Clausen y Spooner (1993), quienes justifican las ventajas de usar este método al momento de identificar cambios hidrológicos a través de los años y en la calidad del agua, atribuyéndoles un control estadístico. Asimismo, Petrakis et al. (2021) mencionan que este método permite cuantificar los efectos de las acciones de manejo que se aplican en las cuencas hidrográficas.

Selección de Microcuencas

Para la selección de las microcuencas Rivera (2021) utilizó la metodología definida anteriormente, utilizando modelos de "Random Forest" (RF) en el análisis de los datos. Estos incluyen: predicción (o pronóstico), preprocesamiento, selección de variables, división del conjunto de datos en periodos de entrenamiento y prueba, y evaluaciones de desempeño predictivo. Para determinar las unidades de análisis, se estableció un universo de microcuencas propuestas a ser analizadas, los cuales fueron clasificados en clústeres. Para ello se utilizaron algoritmos de clasificación, para que el universo sea clasificado en grupos con características similares y comparables entre sí, para observar el efecto de las variables en medición.

El universo comprendió un total de 38 microcuencas con tratamiento y 38 microcuencas sin tratamiento. No obstante, éstas fueron depuradas para dejar las cuencas que tengan características mínimas de comparabilidad. Por lo que, en esta investigación se trabajó con cuencas que presentaron una mayor accesibilidad para la instalación del equipo y las visitas en campo.

Para la selección de cuencas pareadas, los expertos y técnicos examinaron los parámetros morfométricos y biofísicos, de tal forma que posean requerimientos mínimos de comparabilidad.

Aunque las microcuencas no sean completamente idénticas, deben ser comparables tanto como en topografía, vegetación, características de suelo y/o clima (Clausen y Spooner, 1993). Las variables biofísicas y climáticas que se analizaron en el proyecto de consultoría por Rivera (2021) se describen en el Cuadro 1. La geología fue una de las variables principales para la formación de los clústeres, de modo que, los pares de microcuencas pertenezcan a un mismo grupo litológico; tal como describen Ssegane et al. (2013) el método de cuencas pareadas, los pares de cuencas deben ser comparables en topografía, vegetación, suelo y clima y los tipos de suelos.

Cuadro 1

Variables para la clasificación de los pares de microcuencas.

Variable	Tipo de variable
Geología	Biofísica
Topografía	Biofísica
Elevación	Biofísica
Pendiente media	Biofísica
Acumulación de flujo	Biofísica
Red de drenaje	Biofísica
Área	Biofísica
Cobertura y uso de suelo	Biofísica
Hidrología	Biofísica
Área plagada	Biofísica
Área restaurada	Biofísica
Precipitación	Climática
Temperatura	Climática
Evapotranspiración	Climática

Nota. Adaptado de Consultoría de apoyo en la instrumentalización para el monitoreo del indicador hídrico de los proyectos BID 3878/BL-

HO y HO-L1200/HO-G1252 (Rivera, 2021)

Microcuencas de Tratamiento

Para la selección de las microcuencas de tratamiento (reforestación inducida), Rivera (2021) tomó en cuenta solamente las microcuencas del programa de reforestación del Instituto Nacional de Conservación y Desarrollo Forestal, Áreas Protegidas y Vida Silvestre (ICF). Posteriormente, se realizó clústeres para encontrar las mejores opciones, que luego serán agrupadas en pares con las microcuencas de control. Este universo se filtró tomando en cuenta la geología y el área total sin intervención de las posibles microcuencas, utilizando herramientas de análisis geográfico que permita

seleccionar las que cumplan con las variables. De las microcuencas resultantes, se seleccionaron las microcuencas de tratamiento que pertenecen a un par, siendo del primer par de microcuencas la quebrada del Plan (Figura 2) y del segundo par por la quebrada Las Guamas (Figura 3).

Figura 2

Quebrada del Plan, Bosque Escolar UNACIFOR (tratamiento)

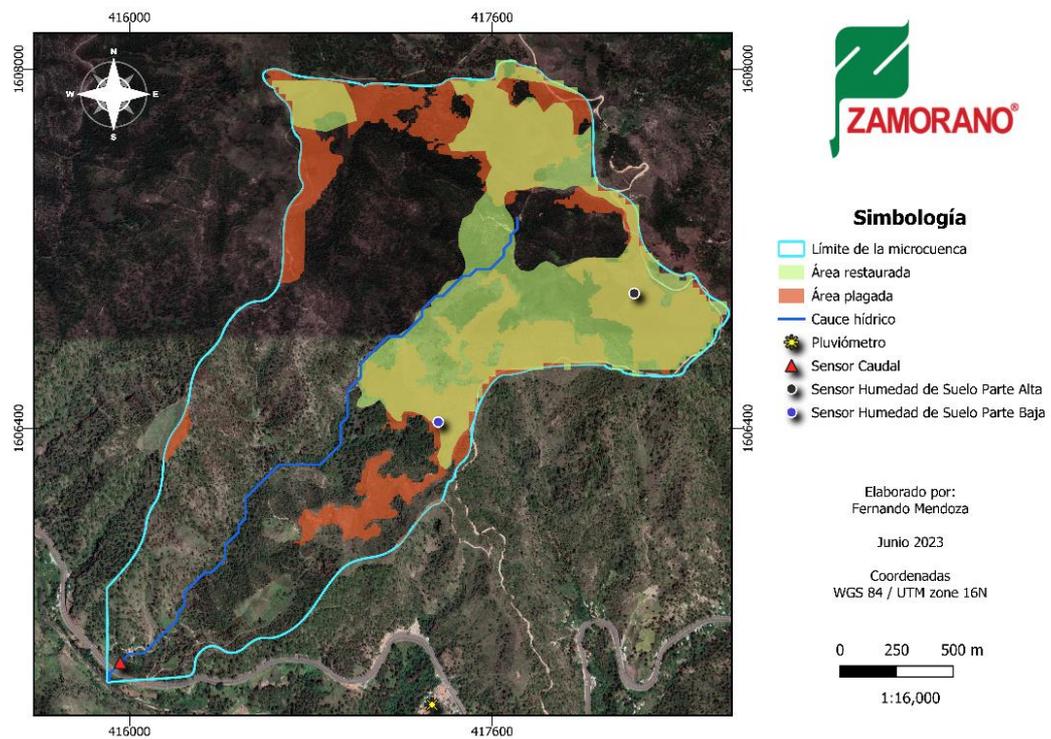
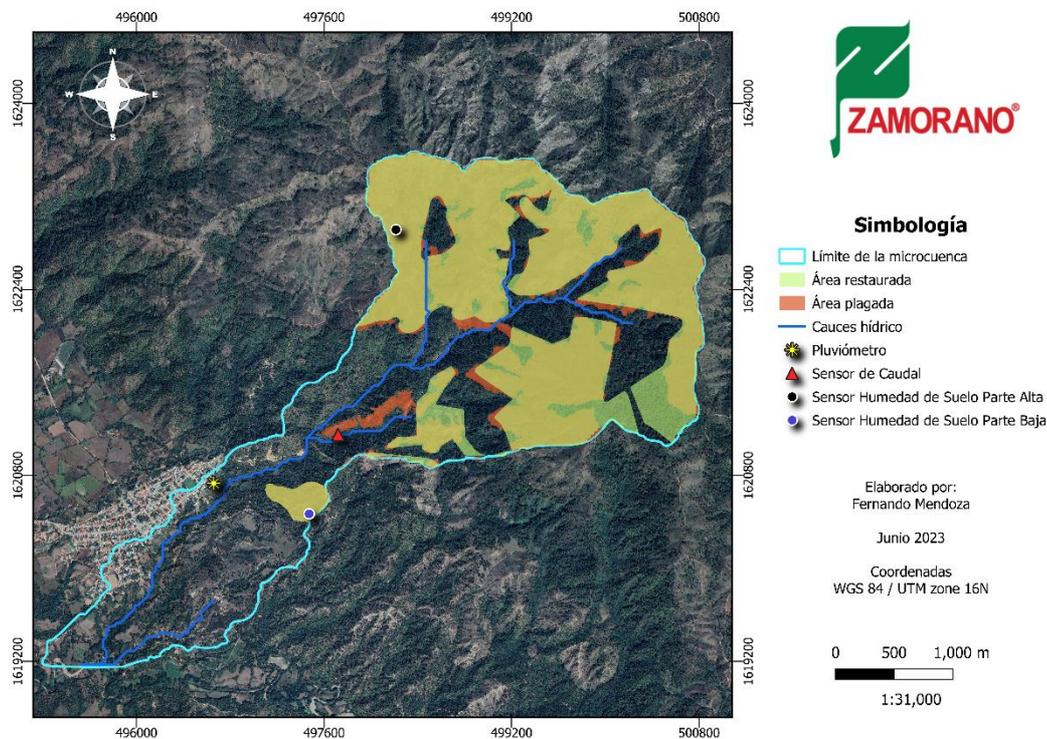


Figura 3

Quebrada El Coyolito (tratamiento)



Microcuencas de Control

Para la selección de las microcuencas de control Rivera (2021) utilizó el procedimiento de conglomerados, tomando como referencia las microcuencas previamente establecidas como tratamiento. Los conglomerados permitieron analizar la estructura de las posibles microcuencas de control en una base de datos, para poder estimar la similitud que poseen con las microcuencas de tratamiento. Se excluyeron las unidades que presentan presencia de proyectos de conservación forestal, para asegurar la ausencia de intervención. Las microcuencas de control seleccionadas pertenecen a su respectivo opuesto de tratamiento, siendo parte del primer par la quebrada Cupiles de Quiles (Figura 4) y del segundo par la quebrada Las Guamas (

Figura 5).

Figura 4

Quebrada Cupiles de Quiles (control)

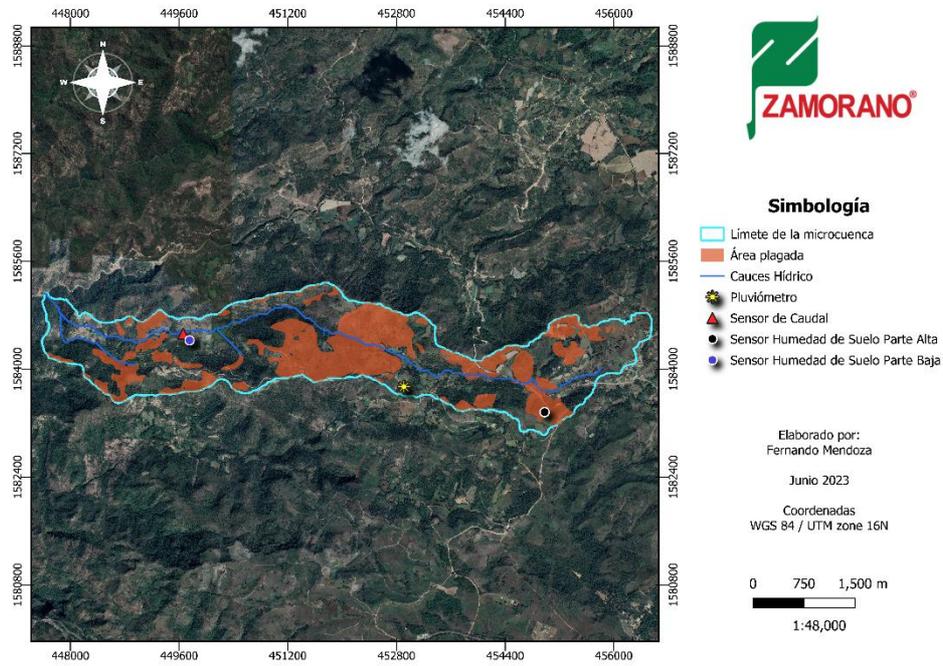
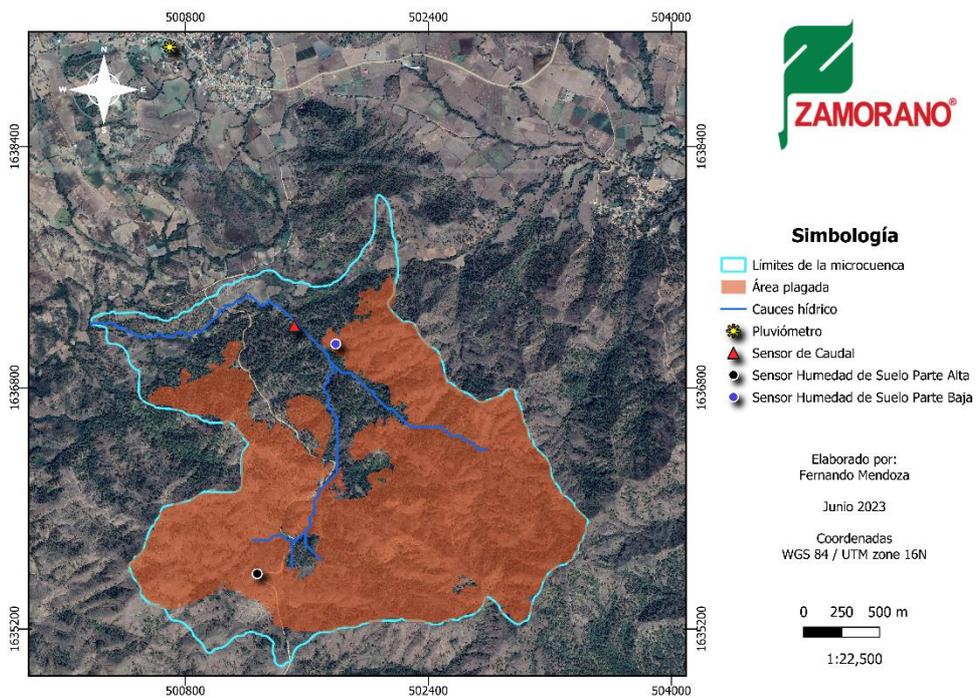


Figura 5

Quebrada Las Guamas (control)



Caracterización Biofísica de las Microcuencas

Parámetros Morfométricos e Hidrológicos

Para la caracterización de las microcuencas, se tomó en consideración los parámetros morfométricos e hidrológicos de cada una de las unidades, siendo esto: área y perímetro, longitud y ancho, factor de forma, coeficiente de “Gravelius”, altura máxima y mínima, pendiente media, longitud del cauce principal, densidad de drenaje, tiempo de concentración y pendiente media del cauce.

Utilizando el programa de “Quantum Geographic Information System (QGIS)”[®] en su versión 3.24.3, se calcularon los parámetros de área, perímetro, longitud y ancho. Asimismo, se estimó la longitud del cauce principal en ambas microcuencas utilizando la red hídrica de Honduras proveniente del Geoportal del ICF de Honduras. Asimismo, haciendo uso de QGIS[®], se manejaron Modelos Digitales de Elevación (DEM) extraídos del portal de Alos Palsar, haciendo uso de la herramienta ráster de Pendientes, y de esta forma obtener en porcentaje un ráster que contenga las pendientes de cada microcuenca. Luego, se reclasificaron las pendientes con la herramienta de Calculadora Ráster, utilizando los rangos de 0-12%, 12-30%, 30-45% y de mayores de 45% de pendientes de cada microcuenca. De esta forma, se obtuvieron los valores necesarios para obtener la altura máxima y mínima y la pendiente media de la microcuenca.

Además, se calculó la densidad de drenaje, la cual nos indica la rapidez de respuesta de la cuenca para drenar del agua frente a un evento de precipitación, relacionando la sumatoria de los cauces principales entre el área de las cuencas; también, se calculó el factor de forma haciendo una relación entre el área de la cuenca entre la longitud cuadrada del cauce. Igualmente, la pendiente media del cauce se calculó al dividir la diferencia de la altura máxima y mínima del cuce entre la longitud de este.

El parámetro de tiempo de concentración se refiere al tiempo que tarda la partícula hidráulicamente más alejada en viajar hasta el punto de salida del cauce, considerando un tiempo de

concentración distribuido uniformemente por toda la cuenca. Los tiempos de concentración cortos están asociados con volúmenes máximos intensos de caudal y recesiones rápidas, mientras que los tiempos de concentración más largos resultan un volúmenes máximos más moderados y recesiones más prolongadas. Se usó la Formula 1 para calcular el tiempo de concentración, obteniendo el tiempo estimado en horas.

$$T_c = 0.3 \times \left(\frac{L}{(P_c)^{\frac{1}{4}}} \right)^{0.76} \quad [1]$$

Donde:

T_c = tiempo de concentración en horas

L = longitud del cauce principal en km

P_c = pendiente media del cauce principal de la cuenca

De igual forma, se calculó el coeficiente de “Gravelius” (C_g), el cual permite conocer las formas de las microcuencas y poder compararlas y está estrechamente relacionado con el tiempo de concentración (Consortio Poma Quindio, 2018). Este parámetro indica la compacidad de las cuencas, relacionando el perímetro de una cuenca con el perímetro de otra cuenca teórica circular de la misma superficie. Cuanto más irregular sea la cuenca, mayor será su coeficiente de compacidad (Jaramillo, 2013). Se usó la Fórmula 2 para calcular el coeficiente de “Gravelius”, para posteriormente identificar la forma de las microcuencas, clasificándolas de $1 \leq 1.25$ como redondas, de 1.26 a 1.50 como ovaladas y ≥ 1.51 como oblongas o cuadradas.

$$C_g = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}} \quad [2]$$

Donde:

C_f = Coeficiente de "Gravelius"

P = Perímetro de la microcuenca (km)

A = Área total de la microcuenca (km²)

Caracterización de Tipo de Suelo

Se realizó una caracterización de la litología utilizando herramientas de análisis geográfico, tomando como referencia la base de datos de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) (1969) sobre los suelos de Honduras. Sin embargo, debido a la baja escala de los datos, se extrajeron muestras de suelo de cada una de las microcuencas, para tener información más precisa del tipo de suelo, principalmente en los lugares donde se ubican los sensores de humedad. Se tomó una muestra por cada sensor, obteniendo en total ocho muestras de suelo por las cuatro microcuencas. Posteriormente, estas muestras fueron analizadas en un laboratorio para obtener las texturas y la cantidad de materia orgánica (MO) que se encuentran en las proximidades de los suelos de cada uno de los sensores de humedad.

Caracterización de Usos en las Microcuencas

Caracterización de Usos y Coberturas.

Se realizaron mapas cartográficos de los usos y coberturas de las microcuencas, utilizando la base de datos del 2018 perteneciente al ICF. De esta forma, se clasificaron e identificaron las distintas coberturas presentes en las microcuencas posteriormente a la plaga del gorgojo.

Zonas Reforestadas y Regeneradas.

Se realizó una zonificación de las partes de las microcuencas de estudio mediante el uso del programa QGIS®, para identificar en que partes de las microcuencas se presentan las coberturas de uso de suelo, el área total plagada, las zonas que fueron reforestadas mediante plantación forestal y las zonas que se encuentran bajo regeneración natural.

Caracterización de Vegetación.

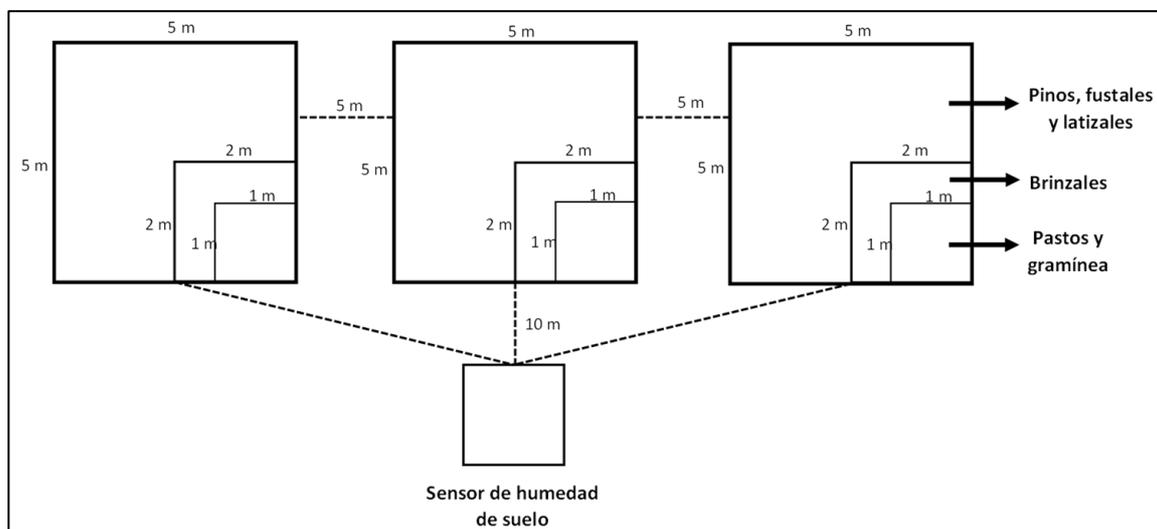
Se realizó una caracterización de las principales coberturas de las microcuencas mediante visitas en campo y medición a través de parcelas de muestreo. El diseño utilizado fue de parcelas anidadas (Figura 6), el cual es muy implementado en el establecimiento de inventarios forestales, ya que divide en subparcelas los resultados obtenidos, capturando una amplia variedad de especies por cada parcela, y por ende se obtendrá una caracterización de la vegetación. Cabe destacar, que la caracterización fue realizada para el área que se encuentra bajo restauración forestal y regeneración natural, en las cercanías de los sensores de humedad de suelo.

Por cada microcuenca de control se realizó tres parcelas cuadradas de 5×5 m (25 m^2) en dirección opuesta al flujo del agua. En estas parcelas se hizo un conteo general de las plantas de pino (fustales, latizales y brinzales) por regeneración natural, y de pinos establecidos por plantación en las microcuencas de tratamiento. Además, se realizó un conteo de los fustales y latizales de otras especies que se encuentren. Los fustales y latizales de pino encontrados fueron incluidos en el conteo total de fustales y latizales. En la parcela de 2×2 m (4 m^2) se realizó un conteo de brinzales y en la parcela de 1×1 m (1 m^2) se tomaron muestras de gramíneas y vegetación menor (incluye helechos, zarzas, otras).

Adicionalmente, a fustales y latizales se les realizó una medición de altura y diámetro de altura de pecho (DAP) o diámetro de altura de cuello (DAC) para el caso de los pinos; mientras que a los brinzales la altura. Los parámetros para los brinzales son plantas <5 cm de DAP y >30 cm de altura, para latizales es ≥ 5 cm y <10 cm de DAP, y para fustales es de ≥ 10 cm de DAP (Louman et al., 2001).

Figura 6

Método de parcelas anidadas para caracterización in situ para las microcuencas



Evaluación de Humedad de Suelo en las Microcuencas

Recolección de Datos

Los datos de humedad de suelo, precipitación, temperatura y caudal de salida se registraron en cada hora durante el período de recolección. Este período consistió desde el 8 de febrero de 2022 hasta 10 de mayo de 2023. Parte de estos datos fueron analizados previamente por Mejía (2022), consistiendo entre el 2 de febrero al 16 de mayo de 2022. Se utilizaron pluviómetros HOBO® para la recolección de datos de precipitación y duración de cada evento de precipitación. Igualmente, se usaron de sensores de humedad de suelo y temperatura HOBO para monitorear estas variables en las microcuencas.

Los datos de humedad se expresan en unidades m^3 de agua/ m^3 de suelo, y los datos de temperatura en grados Celsius. La extracción de los datos fue mediante las estaciones grabadoras de datos y "software" HOBO, los cuales se encuentran cercanas a los instrumentos. Con los datos recolectados, se realizaron gráficos que representan la evolución del comportamiento de la humedad de suelo durante todo el período de registro, permitiendo observar el comportamiento en la parte alta y baja de cada microcuenca en relación con la precipitación. Asimismo, también realizaron

gráficos que permiten observar el comportamiento de la humedad entre cada par de microcuencas, comparando la parte alta y la parte baja por separado.

Instrumentos Hidrometeorológicos de Medición

Se utilizaron equipos que permitan realizar las mediciones de humedad y caudal de salida. Para ello, primeramente, se hizo uso de sensores de temperatura y humedad del suelo HOB0 EC5 “Soil Moisture” (dos por microcuencia) (Anexo A, Anexo U), pluviómetros HOB0 “RainGauge” 0.2 mm “with pendant” RG3-M (uno por microcuencas) (Anexo B, Anexo L, Anexo Z y Anexo HH) y grabadores de datos y “software HOB0 Waterproof Shuttle” (uno por microcuencas) (Anexo C). Estos equipos fueron instalados por un técnico y se encuentran en las microcuencas desde el 2 de febrero de 2022, ya que la medición de los datos comenzó en esa fecha.

Previo a la instalación de estos instrumentos, se estableció la viabilidad y seguridad para obtener un óptimo rendimiento y se tomó en cuenta para la ubicación el centroide del polígono del área afectada por la plaga (Campbell et al., 2016). Ya en campo, los sensores fueron instalados en la parte y baja del área analizada, siendo esta el área afectada por la plaga de cada microcuencia; y de esta forma, observar y evaluar el comportamiento de la humedad de suelo en ambas partes.

Posterior a su instalación, se realizó un período de prueba y calibración antes de la toma de datos. Los equipos fueron programados en el formato horario de 24 horas, para obtener un dato por cada hora. La recolección de los datos se realiza de forma mensual y luego para la lectura de los instrumentos, los datos fueron tabulados y graficados mediante el “software HOB0were” y consecutivamente exportados a “Microsoft Excel®” como ficheros. El mantenimiento de los sensores se realiza cada mes que se recolectan los datos; se observa la integridad de estos y se reinician en caso de presentar algún fallo.

Análisis de Datos

Los datos fueron analizados mediante un Análisis de la Varianza (ANDEVA) utilizando el modelo estadístico Lineal Generalizado Mixto (GLMM). Bandera-Fernández y Pérez-Pelea (2018)

mencionan que este modelo permite trabajar con variables de respuesta que no presentan una distribución lineal. En este estudio las variables no lineales serán la humedad del suelo, la precipitación, cobertura vegetal y la temperatura.

Para casos similares como esta investigación, los GLMM permiten obtener mejores resultados, ya que al incluir efectos aleatorios no lineales y predictores, reducen de esta forma los sesgos, ajustando los datos dispersos y modelando el error en datos provenientes de mediciones longitudinales (Bandera-Fernández y Pérez-Pelea, 2018). Los datos serán consecutivos en el tiempo, al ser recolectados en formato horario, es decir 24 datos por día, ofreciendo una correlación espacial.

Para el estudio se utilizó un intervalo de confianza del 95%. Además, se realizó una prueba LSD “Fisher” para separar las medias y observar la capacidad de retención de humedad en la parte alta y baja entre cada par de microcuencas. Los datos se analizaron mediante el “software” estadístico “Infostat®” (versión 2020).

Resultados y Discusión

Las unidades seleccionadas para el estudio fueron las microcuencas quebradas del Plan y El Coyolito como tratamiento y las microcuencas quebradas Cupiles de Quiles y Las Guamas como control. Las microcuencas de tratamiento se encuentran bajo restauración mediante plantación forestal inducida, mientras que, las microcuencas control están bajo regeneración natural. Las cuatro microcuencas fueron afectadas por la plaga del Gorgojo Descortezador de pino durante episodio de plaga ocurrido durante 2015-2017 (Taiwan International Cooperation and Development Fund [ICDF], 2018); y las áreas de regeneración y plantación se desarrollan principalmente en donde la plaga afectó los bosques de pino.

Caracterización Biofísica de las Microcuencas

Parámetros Morfométricos e Hidrológicos

La microcuenca quebrada del Plan tiene un área de 3.6 km² y un perímetro de 9.53 km, con una longitud de 3.82 km y un ancho de 0.94 km; además, presenta una pendiente media de la cuenca de 34.16%, con altitud máxima de 1,121 ms.n.m. y una mínima de 877 ms.n.m. Por su parte, la microcuenca quebrada Cupiles de Quiles, presenta una superficie de 9.77 km² y un perímetro de 22.94 km, junto con una longitud de 10.54 km y un ancho de 0.93 km; también, se identifica una pendiente media de la cuenca de 20.96%, con altura máxima de 1,452 ms.n.m. y una mínima de 980 ms.n.m. (Cuadro 2). La microcuenca Cupiles de Quiles posee rango de altura superiores y una mayor extensión de área en la parte alta y un área menor en la parte baja en comparación con la quebrada del Plan; está última, presenta una forma más alargada.

Se obtuvo un $C_g = 1.41$ para la microcuenca del Plan, clasificándola con forma ovalada, aunque muy cercana a oblonga; mientras que para Cupiles de Quiles se obtuvo $C_g = 2.06$, clasificándola como oblonga o rectangular. La organización Consorcio Poma Quindio (2018) menciona que mientras el valor de este coeficiente se aproxime a 1, indicará la tendencia a concentrar mayores volúmenes de agua de escurrimiento, es decir que mientras un valor más bajo del C_g mayor será el tiempo de

concentración. Asimismo, la microcuenca del Plan se obtuvo una longitud de cauce de 3.07 km, una densidad de drenaje de 0.85, un factor forma de 0.38, un tiempo de concentración de 0.42 horas o 25 minutos, y una pendiente del cauce de 7.96%. Para la microcuenca Cupiles de Quiles, se estimó una longitud de cauce de 9.81 km, una densidad de drenaje de 1.24, un factor forma de 0.10, un tiempo de concentración de 1.24 horas o 74 minutos, y una pendiente del cauce de 4.81%.

A partir de los parámetros morfométricos (Cuadro 2), la quebrada del Cupiles de Quiles presenta un factor forma más cercano a 0, y este tipo de cuencas tienden a presentar un flujo hídrico más veloz por tener una forma alargada (Villota Rosero, 2019) y también al presentar un coeficiente de Gravelius de 2.06, la establece con forma oblonga. Sin embargo, la microcuenca del Plan posee un tiempo de concentración menor que la quebrada Cupiles de Quiles, presentando una forma más ovalada o C_g más cercano a 1, un factor de forma mayor y una pendiente más escarpada. Esto se debe a que la quebrada Cupiles de Quiles presenta una mayor longitud del cauce, mayor área, una pendiente más moderada y menor cauce en comparación que la quebrada del Plan.

Cuadro 2

Parámetros morfométricos de las microcuencas Quebrada del Plan y Quebrada Cupiles de Quiles

Parámetros	Quebrada del Plan	Quebrada Cupiles de Quiles
Área de la cuenca (km ²)	3.60	9.77
Perímetro de la cuenca (km)	9.53	22.94
Longitud (km)	3.82	10.54
Ancho (km)	0.94	0.93
Factor de forma	0.38	0.10
Coeficiente de "Gravelius"	1.41	2.06
Altura máxima (ms.n.m.)	1,121	1,452
Altura mínima (ms.n.m.)	877	980
Pendiente media de la cuenca (%)	34.16	20.96
Longitud del cauce principal (km)	3.07	9.81
Densidad de drenaje	0.85	1.236
Tiempo de concentración (hora)	0.42	1.24
Pendiente media del cauce (%)	7.96	4.81

La microcuenca quebrada Coyolito tiene un área de 9.36 km^2 y un perímetro de 18.51 km , con una longitud de 8.1 km y un ancho de 1.16 km ; además, presenta una pendiente media de la cuenca de 30.31% , con altitud máxima de $1,090 \text{ ms.n.m.}$ y una mínima de 668 ms.n.m. Por su parte, la microcuenca quebrada Las Guamas, presenta una superficie de 5.24 km^2 y un perímetro de 12.66 km , junto con una longitud de 5.35 km y un ancho de 0.98 km ; también, se identifica una pendiente media de la cuenca de 26.63% , con altura máxima de 944 ms.n.m. y una mínima de 844 ms.n.m. (Cuadro 3). La microcuenca El Coyolito posee un valor de altura superior y una mayor extensión de área en la parte alta, un área menor en la parte baja y una forma más alargada en comparación con la quebrada Las Guamas.

Se calculó el coeficiente de "Gravelius" (C_g) para ambas microcuencas. Para la microcuenca El Coyolito, se obtuvo un $C_g = 1.69$; mientras que para Las Guamas se obtuvo $C_g = 1.55$, clasificando ambas quebradas con forma oblonga o rectangular. De igual forma, para la microcuenca El Coyolito se obtuvo una longitud de cauce de 6.6 km , una densidad de drenaje de 1.23 , un factor forma de 0.21 , un tiempo de concentración de 0.82 horas o 49 minutos, y una pendiente del cauce de 6.39% . Para la microcuenca Las Guamas, se estimó una longitud de cauce de 3.61 km , una densidad de drenaje de 1.03 , un factor forma de 0.40 , un tiempo de concentración de 0.71 horas o 42 minutos, y una pendiente del cauce de 2.77% .

Tomando en cuenta los parámetros morfométricos (Cuadro 3), ambas microcuencas presentan una pendiente moderada; aunque Las Guamas tiene una diferencia mínima entre altura máxima y mínima que El Coyolito. Del mismo modo, El Coyolito tiene un factor de forma más cercano a 0 , por lo que también tiende a presentar un flujo hídrico más veloz que Las Guamas; y puede verse reflejado en los valores de la pendiente media del cauce, siendo El Coyolito la microcuenca que presenta mayor pendiente. Sin embargo, ambas microcuencas presentan un tiempo de concentración muy similar y densidad de drenaje muy similar. Estos valores están relacionados, debido a que Las Guamas presenta una menor longitud del cauce, menor área, una menor pendiente de la cuenca y del

cauce en comparación que la quebrada Coyolito, y como resultado, la similitud entre los valores de tiempo de concentración y densidad de drenaje; así como también por la similitud en sus valores de

C_g .

Cuadro 3

Parámetros morfométricos de las microcuencas El Coyolito y Las Guamas

Parámetros	Quebrada El Coyolito	Quebrada Las Guamas
Área de la cuenca (km ²)	9.36	5.24
Perímetro de la cuenca (km)	18.51	12.66
Longitud (km)	8.10	5.35
Ancho (km)	1.16	0.98
Factor de forma	0.21	0.40
Coefficiente de "Gravelius"	1.69	1.55
Altura máxima (ms.n.m.)	1,090	944
Altura mínima (ms.n.m.)	668	844
Pendiente media de la cuenca (%)	30.31	26.63
Longitud del cauce principal (km)	6.60	3.61
Densidad de drenaje	1.23	1.033
Tiempo de concentración (hora)	0.82	0.71
Pendiente media del cauce (%)	6.39	2.77

Los resultados de las cuatro microcuencas pueden ser comparados con la investigación de Altaf et al. (2013), en la cual indica que la elevada densidad de drenaje puede llegar a indicar una mayor escorrentía superficial. En estas cuencas la densidad de drenaje es muy similar; así como también la una forma oblonga o rectangular según el coeficiente de compacidad o de "Gravelius".

Pendientes de las Microcuencas

La microcuenca quebrada del Plan (Figura 7) presenta principalmente pendientes de 12-30% y 30-45% con 132.77 y 122.25 ha respectivamente, entre las partes medias y altas de la microcuenca. De igual forma, presenta pendientes de > 45% en la parte baja con un área total de 76.19 ha. Por otro lado, en la quebrada Cupiles de Quiles (Figura 8) se encontraron pendientes entre 0-12% con 294.95 ha y 12-30% con 476.48 ha, principalmente en las partes medias y altas de la microcuenca; aunque, en la parte baja se muestran pendientes entre 30-45% y > 45% (Cuadro 4). Además, en ambas

microcuencas, las pendientes que predominan en la mayor parte de su área total se encuentran entre 12-30%.

Figura 7

Mapa de pendientes de la microcuenca quebrada del Plan

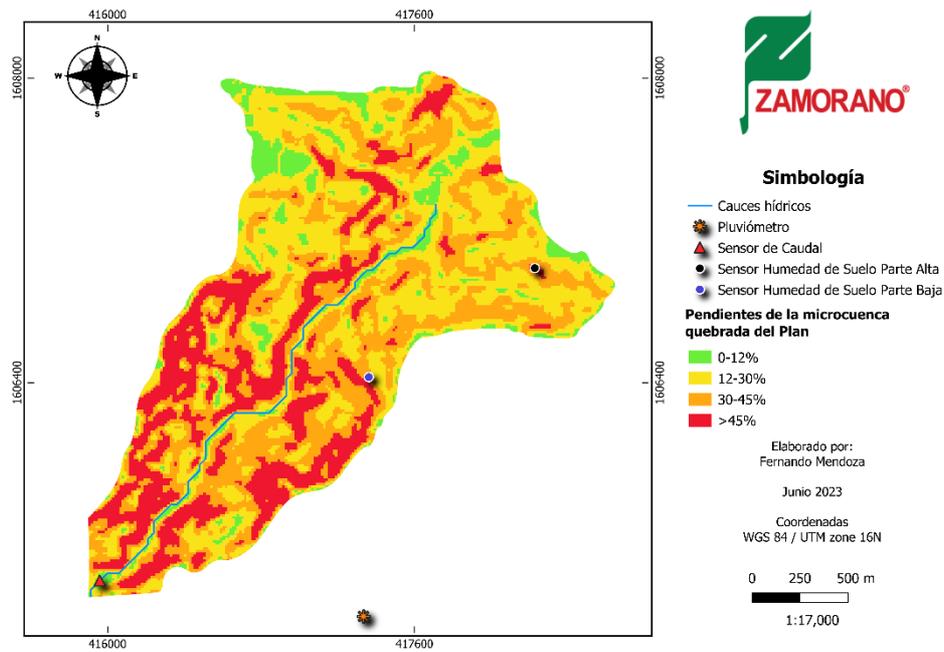
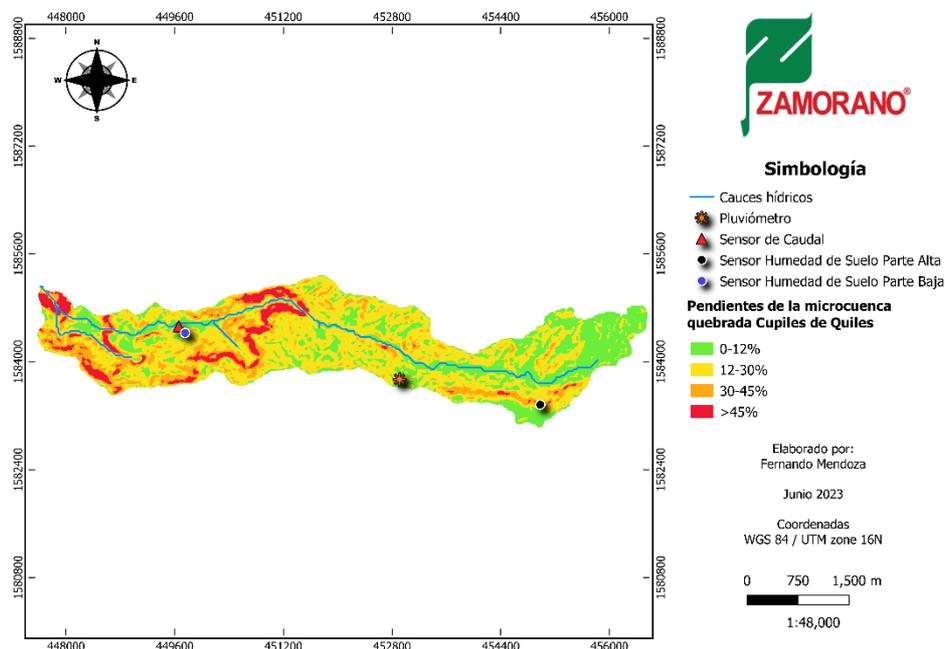


Figura 8

Mapa de pendientes de la microcuenca quebrada Cupiles de Quiles



Cuadro 4

Rango de pendientes de las microcuencas quebradas del Plan y Cupiles de Quiles

Clasificación de pendientes	Q. del Plan		Q. Cupiles de Quiles	
	Área (ha)	Porcentaje (%)	Área (ha)	Porcentaje (%)
0-12%	29.13	8.09	294.95	30.20
12-30%	132.77	36.85	476.48	48.78
30-45%	122.25	33.93	139.69	14.30
>45%	76.19	21.14	65.58	6.71

La microcuenca El Coyalito (Figura 9) presenta principalmente pendientes de 12-30% y 30-45% con 317.07 y 298.71 ha respectivamente, entre las partes medias y altas de la microcuenca. Del mismo modo, se observan pendientes de >45% en la parte alta con un área total de 166.33 ha. Por otra parte, la quebrada Las Guamas (Figura 10), tiene pendientes entre 12-30% con 249.41 ha y 30-45% con 143.97 ha; además, en las partes más altas se observan la gran mayoría de pendientes de >45% con un área de 48.64% (Cuadro 5). Cabe destacar que el resto de las pendientes se encuentran

distribuidas entre las partes bajas, medias y altas de la microcuenca. Además, en ambas microcuencas, las pendientes que predominan en la mayor parte de su área total se encuentran entre 12-30%.

Según el estudio de Wilson et al. (2016), encontraron que la humedad del suelo se relaciona con la pendiente del terreno, encontrando menor niveles de humedad en zonas con mayor inclinación o pendiente, y una acumulación mayor de humedad en áreas con menor pendiente. De igual forma, Abiy y Melesse (2017) establecen que las pendientes pronunciadas favorecen la escorrentía, así como un flujo subsuperficial acelerado limitan la acumulación de agua en el suelo, y pendientes suaves favorecen a una mayor acumulación.

Figura 9

Mapa de pendientes de la microcuenca quebrada Coyolito

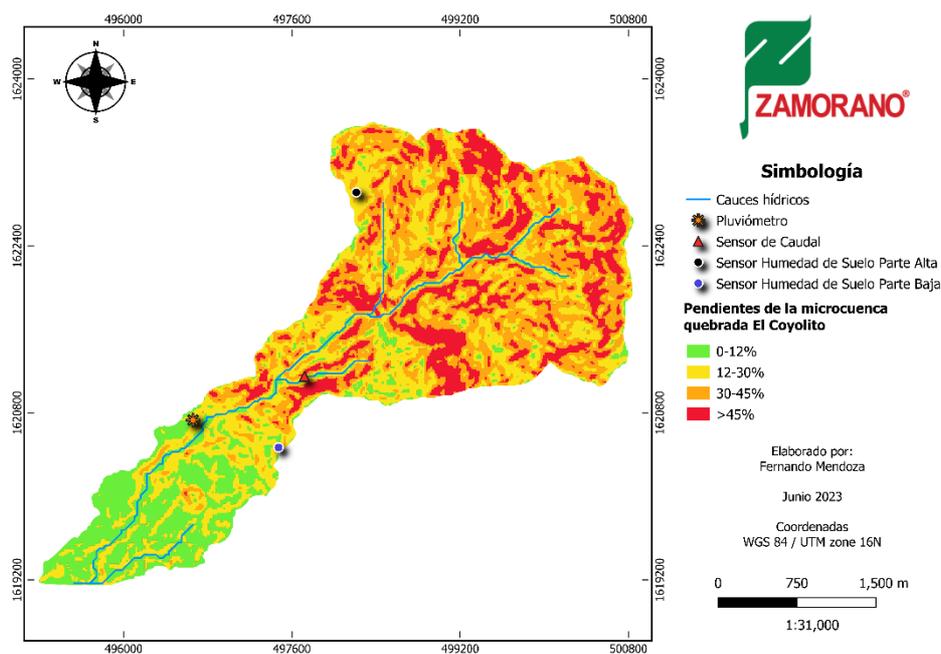
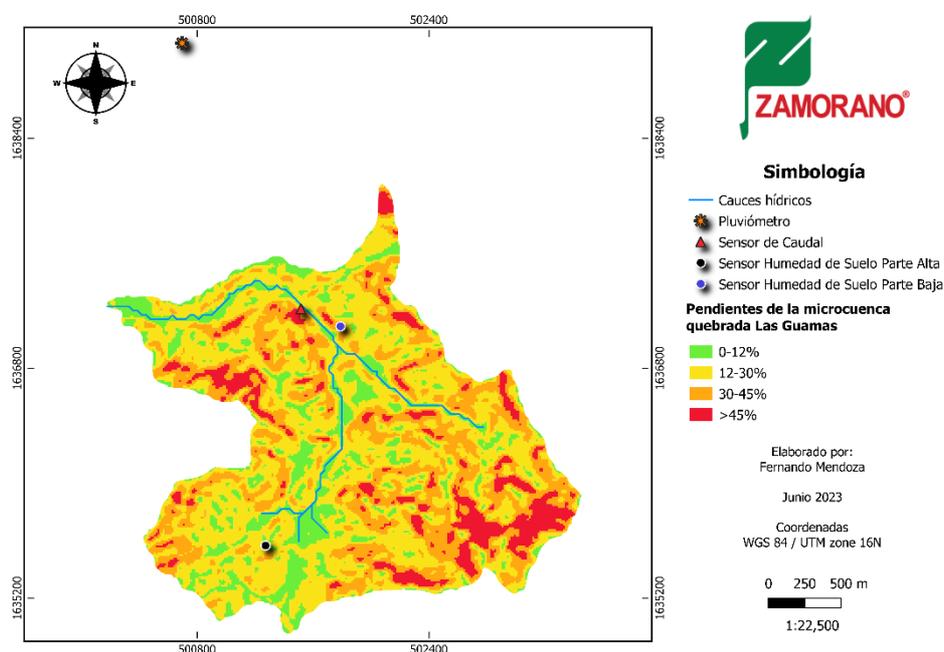


Figura 10

Mapa de pendientes de la microcuenca quebrada Las Guamas



Cuadro 5

Rango de pendientes de las microcuencas de estudio quebradas El Coyolito y Las Guamas

Clasificación de pendientes	Q. Coyolito		Q. Las Guamas	
	Área (ha)	Porcentaje (%)	Área (ha)	Porcentaje (%)
0-12%	154.33	16.48	81.10	15.47
12-30%	317.07	33.86	249.41	47.59
30-45%	298.71	31.90	143.97	27.47
>45%	166.33	17.76	49.64	9.47

Caracterización de Tipo de Suelo de las Microcuencas

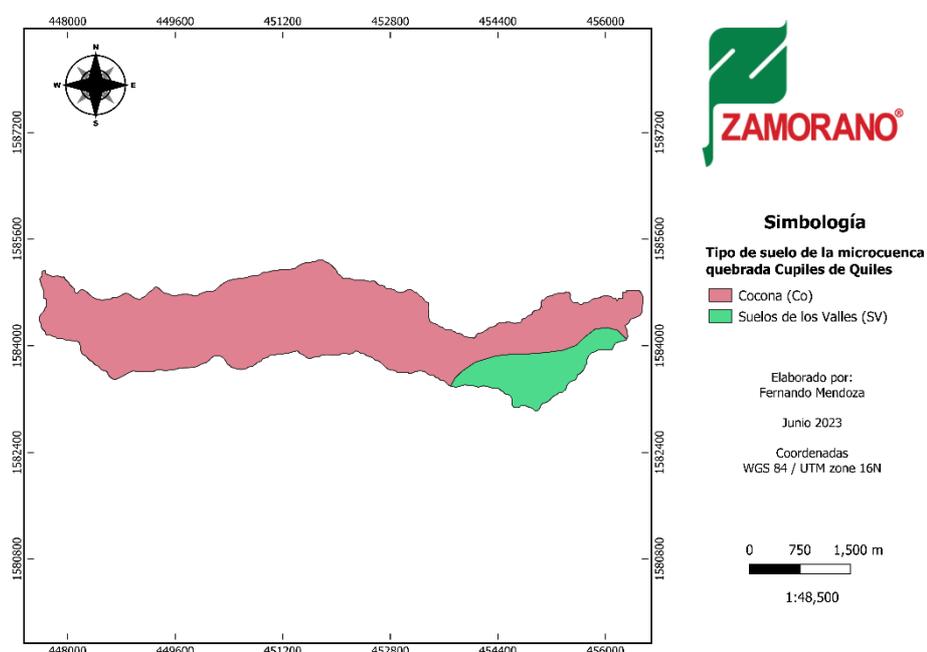
Para obtener los distintos tipos de suelos presentes en las microcuencas estudiadas, se extrajo un “shapefile” de los tipos de suelos identificados en Honduras en escala de 1:250,000. Los suelos se clasifican en cuatro grandes grupos según la naturaleza de la roca madre y otras variables, como la profundidad de la capa de suelo, la retención de humedad, la altitud y distribución de precipitaciones.

De acuerdo con la clasificación de suelos realizada por la FAO (1969), se ha determinado que en la microcuenca del Plan el tipo de suelo predominante en su totalidad el tipo de Suelo de los Valles (SV) en su totalidad. Por otro lado, la quebrada Cupiles de Quiles (Figura 11) cuenta con 125.07 ha (12.8%) (Cuadro 6) de este mismo tipo de suelo, el cual se caracteriza por encontrarse en valles internos o entre montañas, y presentan texturas franco limosos y franco arenosos; así como drenajes que se clasifican entre buenos, regulares y mal drenados dependiendo de su profundidad.

Además, se ha identificado que en la microcuenca Cupiles de Quiles (Figura 11) cuenta con el tipo de Suelo Cocona (Co), ocupando 851.63 ha (87.2%) de su superficie (Cuadro 6). Estos suelos son bien drenados, poco profundos formados sobre ignimbritas de grano grueso, y la textura suele ser franco arenoso. Cabe destacar que tanto los suelos SV y Co, pertenecen al grupo de suelos formados sobre depósitos aluviales (FAO, 1969).

Figura 11

Mapa de tipo de suelo de la microcuenca quebrada Cupiles de Quiles



Cuadro 6*Tipo de suelo de las microcuencas quebradas del Plan y Cupiles de Quiles*

Tipo de Suelo	Q. del Plan		Q. Cupiles de Quiles	
	Área (ha)	Porcentaje (%)	Área (ha)	Porcentaje (%)
Suelo de los Valles	360.33	100	125.07	12.80
Cocona			851.63	87.20

Por su parte, la microcuenca El Coyolito (Figura 12), cuenta en su mayoría con el tipo de suelo de Cocona con 630.34 ha (67.31%), y junto con Suelo de los Valles con 115.1 ha (12.29%) y Orica (Or) con 191 ha (20.4%) (Cuadro 7). Por otro lado, la microcuenca quebrada Las Guamas (Figura 13) presenta casi en su totalidad el tipo de suelo de Orica con 500.92 ha (95.57%) y suelo de los Valles con 23.21 ha (4.29%) (Cuadro 7). El tipo de suelo de Orica se caracteriza por ser suelos muy drenados, poco profundos, formados sobre roca micacita. Por lo general, son suelos franco arenosos y tienen poca variación de un área a otra; aunque, la principal variación consiste en el contenido de grava y de mica (FAO, 1969).

Para tener datos más precisos sobre el tipo de suelo de cada microcuenca, se extrajo una muestra de suelo por cada sensor de humedad en las cuatro microcuencas. En total se extrajeron y analizaron ocho muestras, evaluando en laboratorio los parámetros de textura y materia orgánica (MO).

Figura 12

Mapa de tipo de suelo de la microcuenca quebrada Coyolito

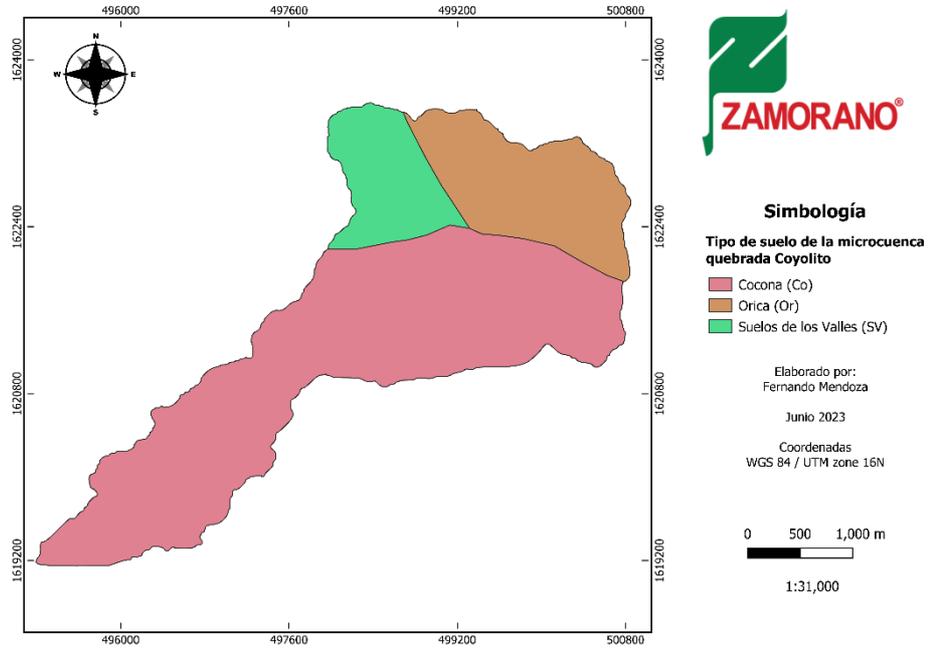
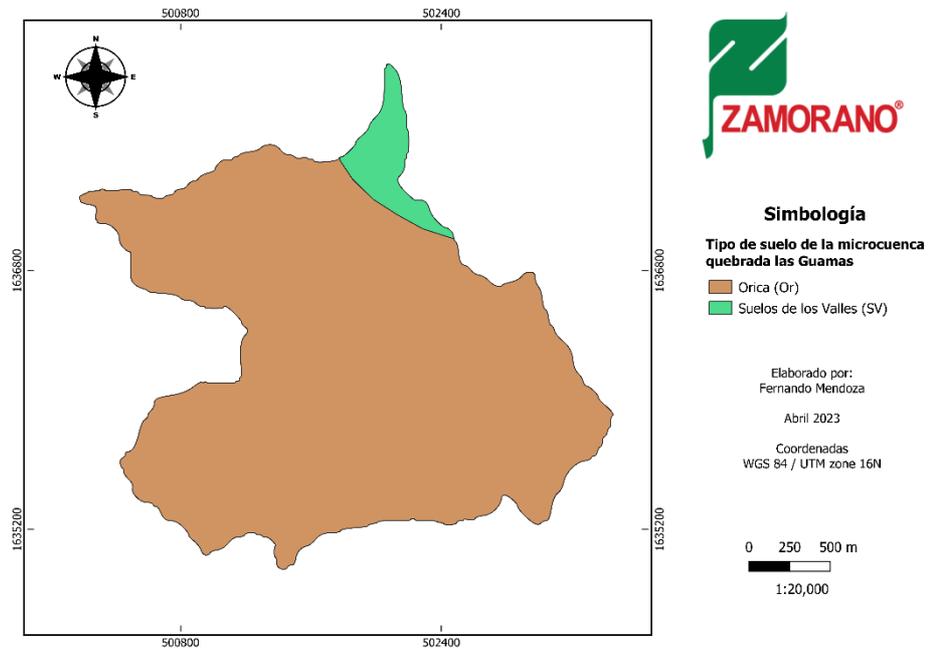


Figura 13

Mapa de tipo de suelo de la microcuenca quebrada Las Guamas



Cuadro 7

Tipo de suelo de las microcuencas quebradas El Coyolito y Las Guamas

Tipo de suelo	Q. Coyolito		Q. Las Guamas	
	Área (ha)	Porcentaje (%)	Área (ha)	Porcentaje (%)
Suelo de los Valles	115.10	12.29	23.21	4.29
Orica	191.00	20.40	500.92	95.57
Cocona	630.34	67.31		

Los análisis de laboratorio indican que la microcuenca del Plan presenta en la parte alta un tipo de suelo franco arenoso, con un 0.56% de MO; mientras que en la parte baja hay un suelo franco con 3.00% de MO (Cuadro 8). Por otro lado, la quebrada Cupiles de Quiles presenta en la parte alta una textura franca con 2.39 de MO y en la parte baja es un suelo franco arenoso con 2.07 de MO.

Por otra parte, la microcuenca El Coyolito presenta en la parte alta una textura franca con 0.86% de MO, y en la parte baja tiene un suelo franco arenoso con un 0.46% de MO. Asimismo, en la quebrada Las Guamas, existe en la parte alta y baja un tipo de suelo franco arenoso, con valores de MO de 1.16 y 0.99% respectivamente (Cuadro 8). En el par de microcuencas, ambas presentan el mismo tipo de suelo (FA) en la parte alta y baja; a excepción de la parte alta El Coyolito que es solamente un suelo franco. De igual forma, Las Guamas muestra un mayor contenido de MO en ambas partes de la cuenca a diferencia El Coyolito, la cual tiene un valor inferior, especialmente en la parte baja.

Al momento de interactuar con la retención de la humedad del suelo, la textura y la materia orgánica (MO) son los que tienen mayor influencia. Por su parte, los suelos con partículas más pequeñas (arcilla y limo) tienen mayor área de superficie y poseen una mayor retención de humedad de suelo, a diferencia de aquellos con partículas más grandes como la arena (Ball, 2023). La textura de suelo que predomina en las cuatro microcuencas es franca arenosa, lo que indica que tiene una retención de humedad de suelo baja-moderada.

Por otra parte, la materia orgánica (MO) tiene una alta capacidad de retención de humedad, y es uno de los factores importantes en cuanto a la capacidad de retención hídrica (Libohova et al., 2018). Asimismo, Libohova et al. indican que la MO presenta una alta correlación en suelos cuando su contenido se encuentra entre un rango de 0 a 100%. Además, encontraron que los suelos con textura arenosa muestran una mayor retención de humedad a medida aumenta el porcentaje de MO en el suelo. Sin embargo, en ambos pares de microcuencas, los valores de MO posiblemente tuvieron mucha influencia sobre la retención de humedad de suelo.

Cuadro 8

Resultados de laboratorio de suelos en los puntos de instalación de los sensores

Características del suelo	Q. del Plan		Q. Cupiles de Quiles		Q. Coyolito		Q. Las Guamas	
	P. Alta	P. Baja	P. Alta	P. Baja	P. Alta	P. Baja	P. Alta	P. Baja
Textura	FA	F	F	FA	F	FA	FA	FA
MO	0.56	3.00	2.39	2.07	0.86	0.46	1.16	0.99

Nota. Franco arenoso (FA) y Franco (F).

Caracterización de Cobertura en las Microcuencas

Caracterización de Usos y Coberturas.

En cuanto a los usos y coberturas que se presentan en la quebrada del Plan (Figura 14), la vegetación que domina el área consiste en Bosques Densos y Ralos de Coníferas, con un área de 136.28 ha y 115.62 ha, respectivamente (Cuadro 9). Además, hay una extensión de 105.58 ha de pinos plagados debido a los ataques de gorgojos, pero el 75% de ellos se está restaurando mediante plantaciones. Por otro lado, la quebrada Cupiles de Quiles (Figura 15) tiene una extensión de 391.8 ha de pinos plagados que se encuentran bajo regeneración natural, así como 244.61 ha de Bosques Densos de Coníferas y 164.7 ha de Bosques Ralos de Coníferas. Además, en esta microcuenca hay 169.82 ha de pastos/cultivos principalmente en las partes altas y bajas; mientras que, en la quebrada del Plan solo hay 1.37 ha, lo cual tiene un gran impacto en la retención de humedad del suelo.

En la microcuenca del Plan, el 69.9% de su área total está cubierta por bosques de pino; mientras que, en la quebrada Cupiles de Quiles, la cobertura de pino es menos predominante, al

abarcar el 41.9% de su área. Por otro lado, en la quebrada Cupiles de Quiles, el área de pino plaga se encuentra principalmente en las partes media y alta; a diferencia de la quebrada del Plan, donde el área afectada se presentó en la parte alta.

Figura 14

Mapa de Usos y Coberturas de la microcuenca quebrada del Plan

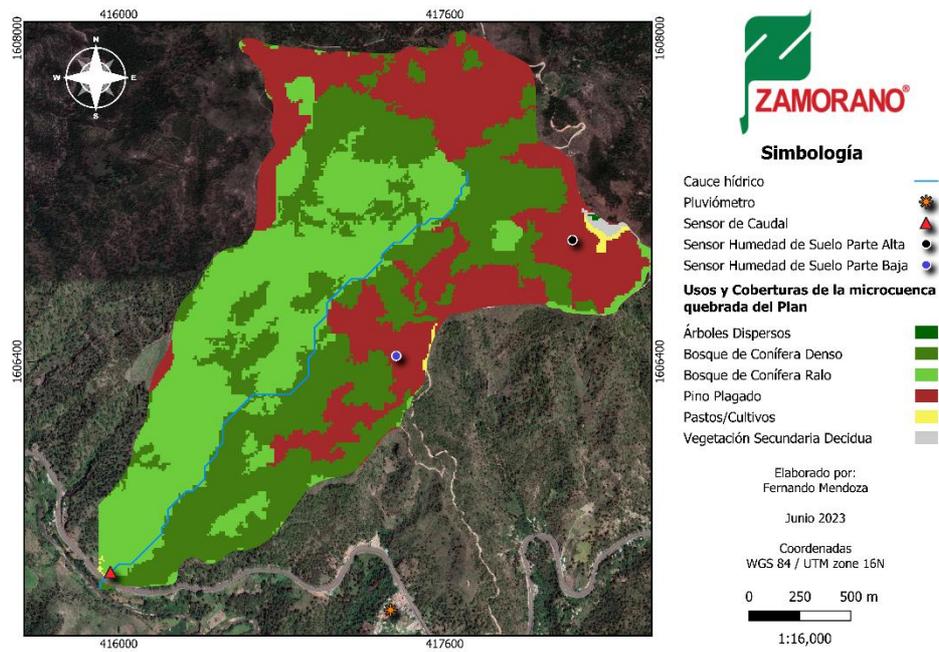
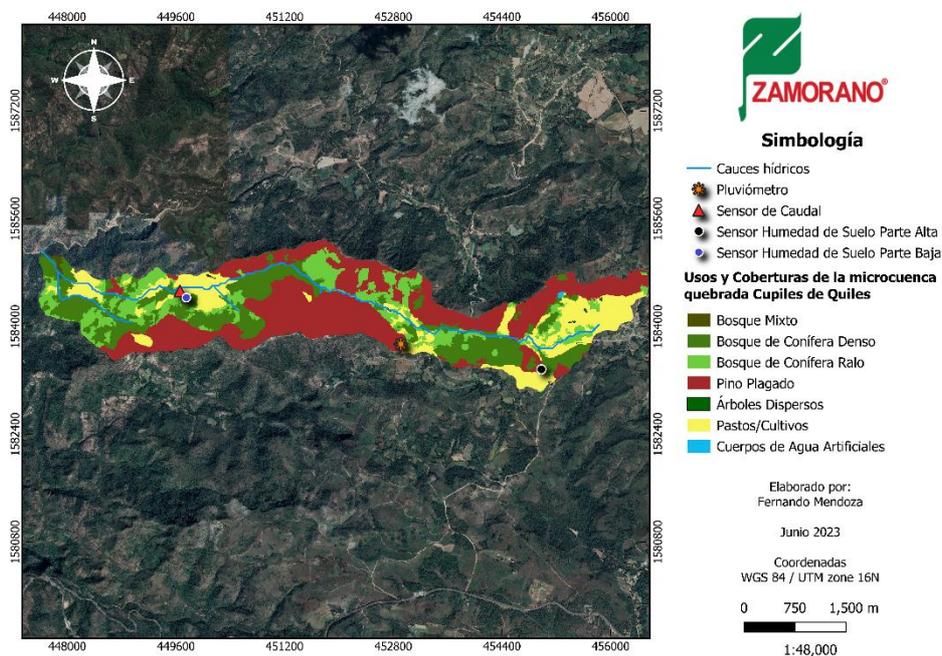


Figura 15

Mapa de Usos y Coberturas de la microcuenca quebrada Cupiles de Quiles



Cuadro 9

Comparación de usos y coberturas de las microcuencas quebradas del Plan y Cupiles de Quiles

Usos y Coberturas	Q. del Plan		Q. Cupiles de Quiles	
	Área (ha)	Porcentaje (%)	Área (ha)	Porcentaje (%)
Bosque Mixto			3.58	0.37
Bosque de Conífera Denso	136.28	37.82	244.61	25.04
Bosque de Conífera Ralo	115.62	32.09	164.7	16.86
Pino Plagado	105.58	29.30	391.8	40.11
Arboles Dispersos	0.11	0.03	1.45	0.15
Pastos/Cultivos	1.37	0.38	169.82	17.39

Por su parte, la microcuenca El Coyolito (Figura 16), la vegetación que domina el área consiste en Bosques Densos con un área de 276.34 ha; presentando menores áreas de Bosque Latifoliado con 61.89 ha, Bosque Mixto con 69.40 ha, Pastos/Cultivos 108.14 ha y Zona Urbana con 22.57 ha (Cuadro 10). Sin embargo, una gran extensión de 388.53 ha de pino fue por la plaga del gorgojo. Por otro lado, la quebrada Las Guamas (Figura 17) presenta una extensión de 127.96 ha de Bosques Densos de

Coníferas y 186.21 ha de Bosques Ralos de Coníferas. Igualmente, se observan 177.97 ha de pinos plagados que se encuentra bajo regeneración natural; además, existen 20.92 ha de pastos/cultivos. En la microcuenca El Coyolito, el 36.9% de su área total está cubierta por bosques de pino; mientras que, en la quebrada Las Guamas, la cobertura de pino es más predominante, al abarcar el 59.9% de su área.

En ambas microcuencas el área plagada ocurrió principalmente en las partes altas y en algunos sitios de parte media. Sin embargo, la quebrada El Coyolito es una zona de mayor producción agropecuaria al presentar mayor área de Pastos/Cultivos e incluso se observa un área de árboles frutales en las parte media y baja de la cuenca, en comparación a Las Guamas.

También, en ambas microcuencas, se encuentran bosques densos de coníferas que abarcan hasta un 30% del área total. Sin embargo, en Las Guamas, también se observa la presencia de bosques de pino ralo, que cubren hasta un tercio del área total. En estos bosques ralos, es posible encontrar una mayor variedad de cobertura secundaria y menor.

En su investigación Martínez-González et al. (2010) establecen que la cobertura vegetal tiene mucha influencia en la retención de humedad en el suelo y esta puede variar tanto en época seca como lluviosa. También, establecen que las raíces profundas transpiran más agua durante periodos secos sostenidos que las plantas de especies con raíces poco profundas; y que la producción de hojarasca depende directamente del tipo de cobertura y su influencia en la retención de humedad.

En las cuatro microcuencas, entre un 30 – 40% de su área total fueron afectadas por la plaga del gorgojo, afectando el ciclo hidrológico en las microcuencas. De este modo, se genera una alteración en el proceso de infiltración, impactando también en la escorrentía al existir una disminución repentina en la masa forestal, se genera un incremento en la velocidad del agua hacia un punto de salida (Hernández, 2016).

Figura 16

Mapa de Usos y Coberturas de la microcuenca quebrada Coyalito

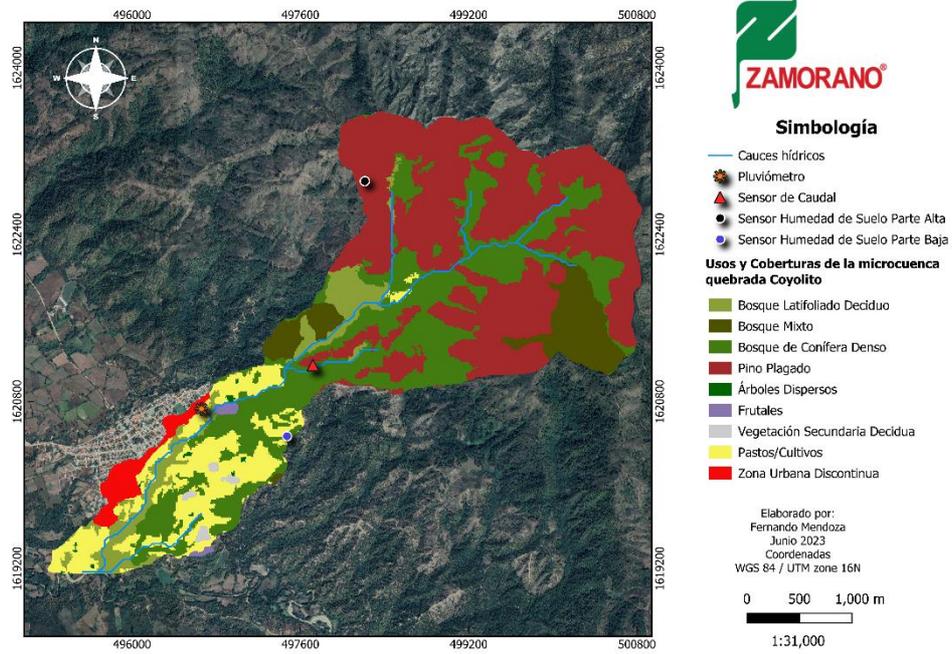
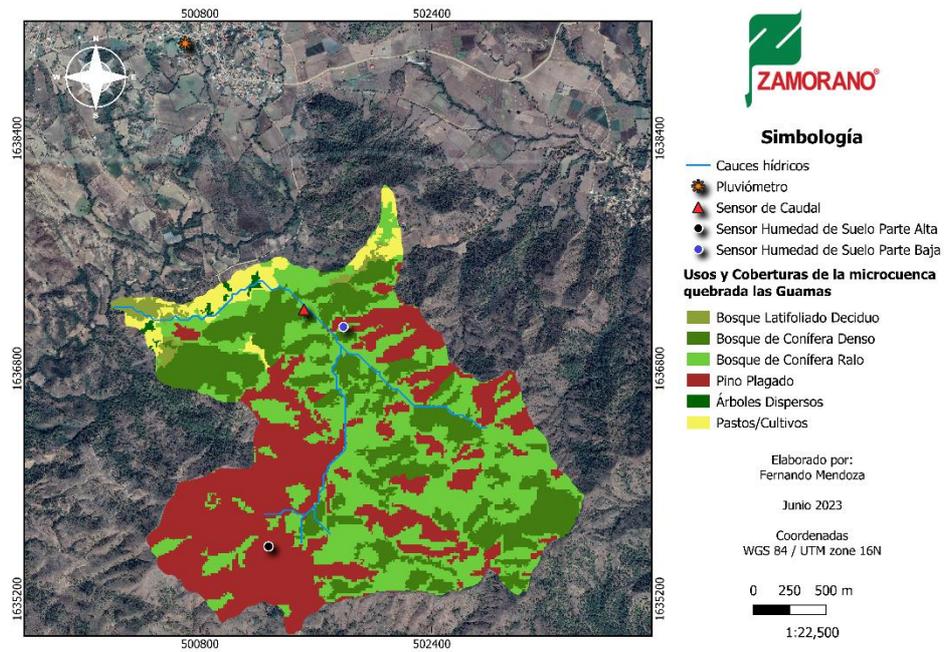


Figura 17

Mapa de Usos y Coberturas de la microcuenca quebrada Las Guamas



Cuadro 10

Comparación de usos y coberturas de las microcuencas quebradas El Coyolito y Las Guamas

Usos y Coberturas	Q. Coyolito		Q. Las Guamas	
	Área (ha)	Porcentaje (%)	Área (ha)	Porcentaje (%)
Bosque Latifoliado Deciduo	61.89	6.61	8.99	1.72
Bosque Mixto	69.40	7.41		
Bosque de Conífera Denso	276.34	29.51	127.95	24.41
Bosque de Conífera Ralo			186.21	35.53
Pino Plagado	388.53	41.49	177.97	33.95
Arboles Dispersos	1.89	0.20	2.10	0.40
Frutales	3.47	0.37		
Vegetación Secundaria Decidua	4.213	0.45		
Pastos/Cultivos	108.14	11.55	20.92	3.99
Zona Urbana Discontinua	22.57	2.41		

Zonas Reforestadas y Regeneradas.

La microcuenca quebrada del Plan tiene un área total de 360.33 ha, de las cuales 145.52 ha (40.4%) fueron afectadas por la plaga del gorgojo descortezador de pino; aunque 109.81 ha (30.47%) fueron restauradas bajo plantación de pino (*Pinus oocarpa*) (Cuadro 11). Actualmente, la plantación se encuentra en su segundo año de establecimiento, y se continúan implementando más proyectos de reforestación. Por otra parte, la quebrada Cupiles de Quiles tiene un área total de 976.7 ha; de las cuales, 338.26 ha (34.63%) se encuentra bajo regeneración natural.

Se realizó una zonificación de las microcuencas, para determinar la parte alta, media y baja de cada microcuenca, mediante en base a las curvas de nivel. De este modo, en las microcuencas del Plan y Cupiles de Quiles, podemos observar que el área afectada ocurrió principalmente en las partes media y alta (Figura 18Figura 19). Igualmente, los proyectos de plantación se ubican principalmente en las zonas afectadas por el gorgojo, y la regeneración natural ocurre en prácticamente toda el área afectada.

Figura 18

Zonificación y área de tratamiento de plantación forestal en la microcuenca quebrada del Plan

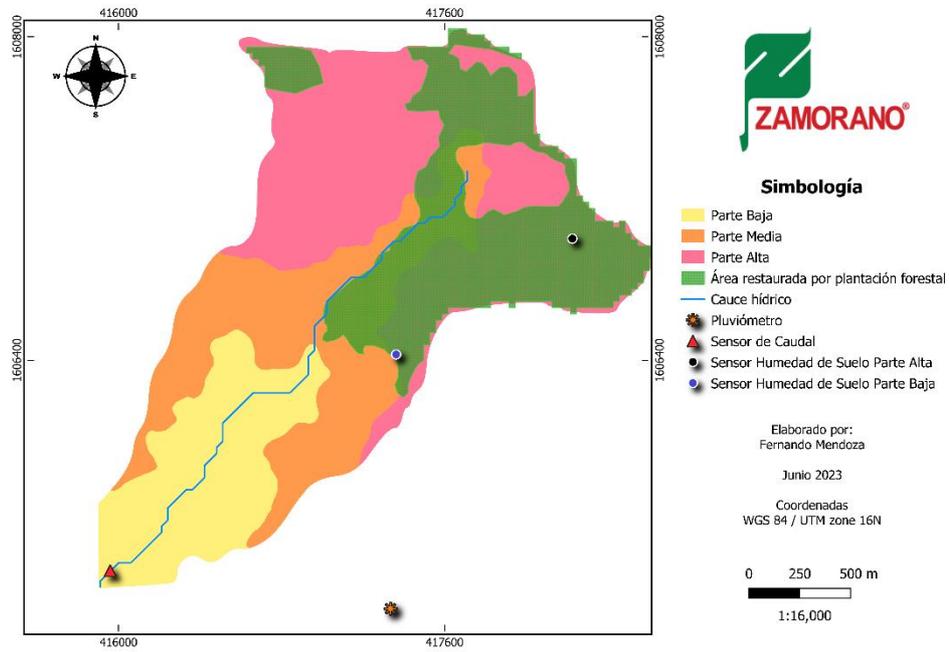
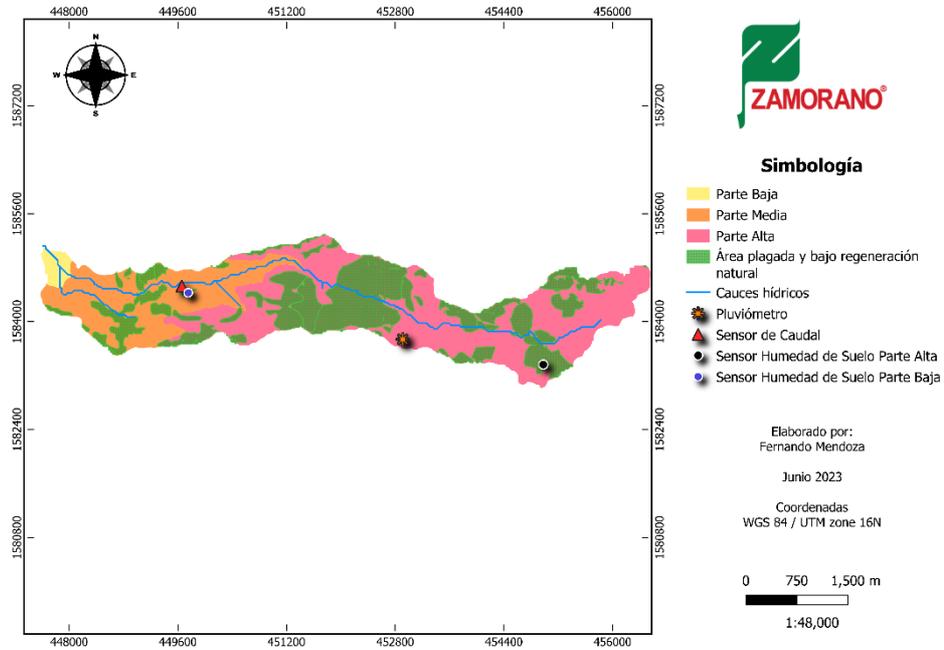


Figura 19

Zonificación y área por regeneración natural en la microcuenca quebrada Cupiles de Quiles



Cuadro 11*Área plagada y restaurada de las microcuencas quebradas del Plan y Cupiles de Quiles*

Microcuenca	Área total de la microcuenca (Ha)	Área plagada (Ha)	Área plagada (%)	Área con plantación forestal (Ha)	Área con plantación forestal (%)
Quebrada del Plan	360.33	145.52 ^a	40.4	109.81	30.47
Quebrada Cupiles de Quiles	976.7	338.26	34.63	Sucesión natural	

Nota. ^adato de referencia utilizado por Mejía (2022).

La microcuenca quebrada El Coyolito tiene un área total de 936.44 ha, de las cuales 400.32 ha (42.7%) fueron afectadas por la plaga del gorgojo descortezador de pino; aunque 436.54 ha (46.62%) fueron restauradas bajo plantación de pino (*Pinus oocarpa*) (Cuadro 12). Actualmente, la plantación se encuentra en su segundo año, aunque se continua con proyectos de plantación nuevos por el resto de la microcuenca. Por otra parte, Las Guamas tiene un área total de 524.13 ha; de las cuales, 361.26 ha (68.98%) se encuentra desde el 2018 bajo regeneración natural. Por otro lado, en las microcuencas El Coyolito y Las Guamas, podemos observar que el área afectada ocurrió principalmente en las partes media y alta (Figura 20 y Figura 21). Igualmente, los proyectos de plantación se ubican principalmente en las zonas afectadas por el gorgojo, y la regeneración natural ocurre en prácticamente toda el área afectada.

Figura 20

Zonificación y área de tratamiento de plantación forestal en la microcuenca quebrada El Coyolito

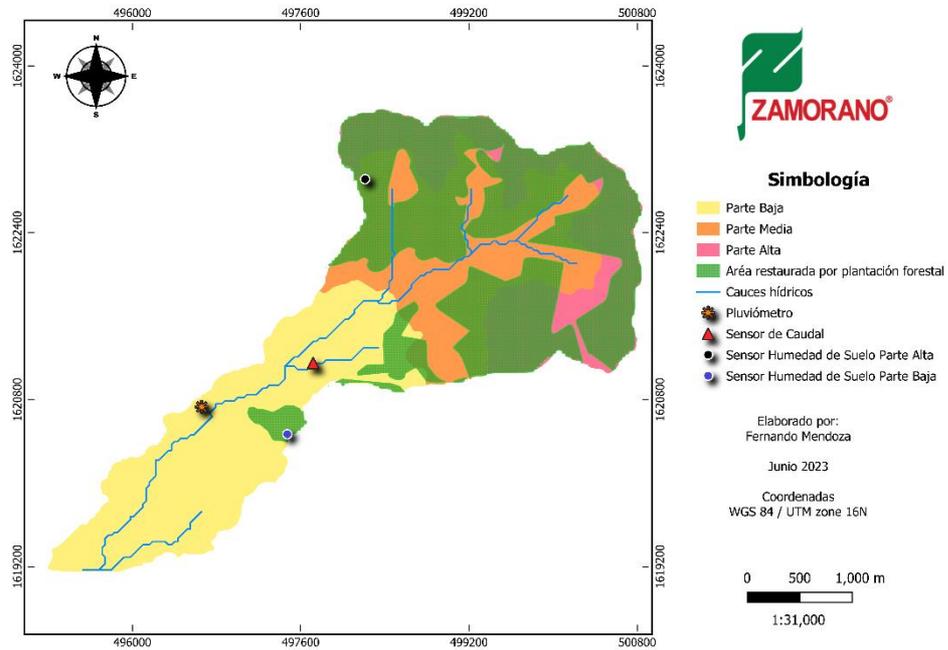
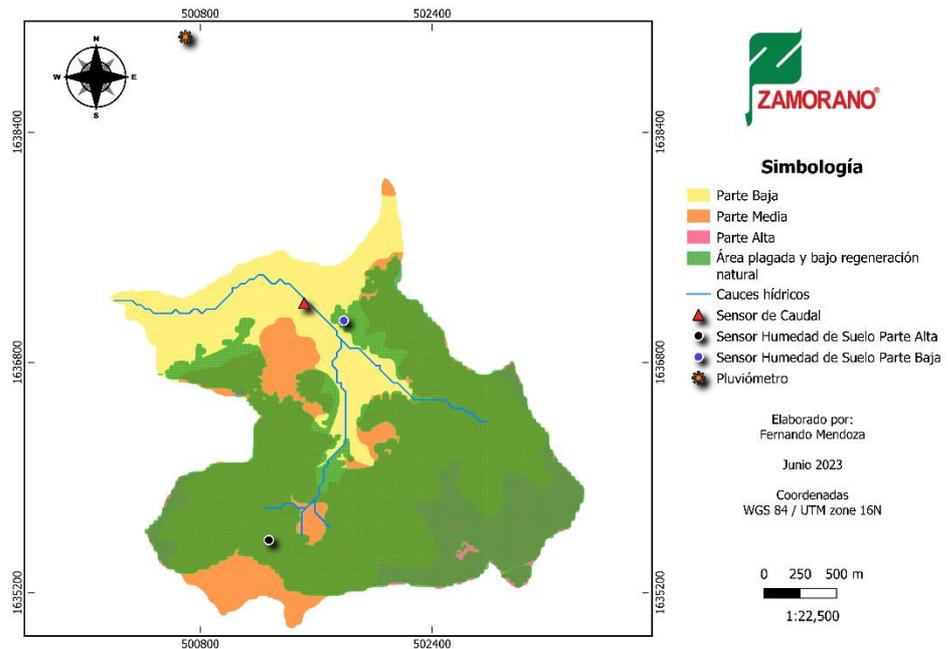


Figura 21

Zonificación y área por regeneración natural en la microcuenca quebrada Las Guamas



Cuadro 12*Área plagada y restaurada de las microcuencas quebradas El Coyolito y Las Guamas*

Microcuenca	Área total de la microcuenca (Ha)	Área plagada (Ha)	Área plagada (%)	Área con plantación forestal (Ha)	Área con plantación forestal (%)
Quebrada El Coyolito	936.44	400.32	42.7	436.54	46.62
Quebrada Las Guamas	524.13	361.53	68.98	Sucesión natural	

Caracterización de Vegetación.

Utilizando las parcelas anidadas, se realizó un conteo de fustales, latizales y plantas de pino en las parcelas de 25 m², midiendo el DAP y la altura. En estas parcelas, solo para el conteo de plantas de pino, consistió tanto de fustales, latizales y brinzales; siendo solo incluidos en la clasificación general los fustales y latizales. Posteriormente se realizó un conteo y medición de altura de brinzales en las parcelas de 4 m². Finalmente se tomaron muestras de vegetación arbustiva secundaria (pastos y gramíneas) en las parcelas de 1 m², y se calculó su peso en húmedo y en seco.

Respecto a la caracterización realizada, en la parte baja de las microcuencas quebrada del Plan (Anexo E Anexo F y Anexo **G**) y Cupiles de Quiles (Anexo M Anexo N Anexo O) se puede observar una mayor presencia de brinzales y vegetación secundaria a diferencia de fustales y latizales (Cuadro 13). En la quebrada del Plan, se puede observar una mayor presencia de plantas de pino en estado juvenil, de fustales y de mayor presencia de vegetación menor (pastos y gramíneas) en comparación a la microcuenca Cupiles de Quiles. Por otro lado, la quebrada Cupiles de Quiles bajo regeneración natural presenta una mayor cantidad de brinzales a diferencia de la microcuenca del Plan que se encuentra bajo plantación (Revisar Anexo N).

Cabe mencionar que la plantación tenía una distancia de 2.5 m entre plantas de pino, siendo de este modo la densidad de siembra fue de 1,600 plántulas/ha. En la microcuenca del Plan, en ambas partes se observa una posible mortalidad de pinos, sin embargo, el porcentaje exacto se desconoce.

Por otro lado, en la microcuenca bajo regeneración natural, las plantas de pino presentes son debido a regeneración natural.

Igualmente, en la parte alta de las microcuencas quebrada del Plan (Anexo H y Anexo I) y Cupiles de Quiles (Anexo P Anexo Q) se puede observar una mayor presencia de brinzales y vegetación secundaria a diferencia de fustales y latizales (Cuadro 13). En la quebrada del Plan, se puede observar una mayor presencia de plantas de pino en estado juvenil, de fustales, brinzales y de vegetación menor (pastos y gramíneas) en comparación a la microcuenca Cupiles de Quiles, la cual presenta plantas de pino más maduros y mayor cantidad de latizales. Por otro lado, en la quebrada del Plan que se encuentra bajo plantación presenta una mayor cantidad de brinzales a diferencia de la microcuenca del Plan bajo regeneración natural.

En ambas partes de las microcuencas, la parte baja presenta una mayor cantidad de brinzales; aunque, en la parte alta se encuentran una mayor cantidad de plantas de pino, fustales y latizales. Sin embargo, en la microcuenca Cupiles de Quiles (regeneración natural) se observa menor cantidad de árboles de pino y vegetación menor en ambas partes de la cuenca, en comparación a la quebrada del Plan (Plantación).

Cuadro 13

Comparación de usos y coberturas mediante muestras in situ en la parte baja y alta de las microcuencas del Plan y Cupiles de Quiles

Cobertura y características	Parte baja		Parte alta	
	Q. del Plan (Plantación)	Q. Cupiles de Quiles (Regeneración natural)	Q. del Plan (Plantación)	Q. Cupiles de Quiles (Regeneración natural)
Numero de plantas de pino/hectárea	933	0	400	267
Altura promedio de planta de pino (cm)	45.83	0	39.00	360.00
DAP de plantas de pino (cm)	0.60	0	0.77	5.25
Fustales y otras especies latifoliadas por hectáreas	267	0	133	0
Altura promedio de los fustales (cm)	300	0	250.00	0.00
DAP de fustales (cm)	36	0	10.00	0.00
Latizales y otras especies latifoliadas por hectáreas	0	0	0	400

Cobertura y características	Parte baja		Parte alta	
	Q. del Plan (Plantación)	Q. Cupiles de Quiles (Regeneración natural)	Q. del Plan (Plantación)	Q. Cupiles de Quiles (Regeneración natural)
Altura promedio de los latizales (cm)	0	0	0.00	201.60
DAP de latizales (cm)	0	0	0.00	5.17
Brinzales/hectárea	28,333	72,500	17,500	15,000
Altura promedio de brinzales (cm)	83.58	199.44	60.05	124.78
Peso gramíneas y vegetación menor en húmedo (ton/ha)	0.86	0.84	0.96	0.47
Peso gramíneas y vegetación menor en seco (ton/ha)	0.78	0.60	0.83	0.33

Respecto a las microcuencas quebradas El Coyolito (Anexo R Anexo S) y Las Guamas (Anexo AA, Anexo **BB** y Anexo **CC**), en la parte baja se puede observar una mayor presencia de brinzales y vegetación secundaria a diferencia de fustales y latizales (Cuadro 14). En la quebrada El Coyolito, se puede observar una mayor presencia de plantas de pino en estado maduro y latizales en comparación a la microcuenca Las Guamas, la cual presenta mayor cantidad de brinzales y vegetación menor (pastos y gramíneas).

Por otro lado, en la microcuenca Las Guamas (Anexo DD, Anexo **EE**, Anexo **FF** y Anexo **GG**), en la parte alta se puede observar una mayor presencia de brinzales y vegetación menor, a diferencia de la quebrada El Coyolito (Cuadro 14) (Anexo T, Anexo **V** y Anexo **W**). En la quebrada El Coyolito, se puede observar una mayor presencia de plantas de pino y latizales en comparación a la microcuenca Las Guamas, la cual presenta mayor cantidad de fustales y brinzales.

Además, en la quebrada Las Guamas, bajo regeneración natural, se observan mayor cantidad de brinzales y vegetación menor (pastos y gramíneas) a diferencia de la microcuenca El Coyolito que se encuentra bajo plantación. De igual forma, en la quebrada El Coyolito un par de meses previo al muestreo ocurrió una serie de incendios, por lo que la vegetación secundaria y menor en esta se vio muy afectada al momento de la medición y muestreo (Anexo R, Anexo **S**, Anexo **T**, Anexo **V**, Anexo **W** y Anexo **X**). Aunque, cabe destacar que de acuerdo con el técnico en campo Oscar Fuentes, al

momento de realizar una visita en las semanas previas al incendio, se observó una cobertura vegetal secundaria y menor de densidad moderada.

Cabe mencionar, que el distanciamiento entre plantas de pino es de 2.5 metros, por lo tanto, la densidad de siembra fue de 1,600/ha. De este modo, en la parte baja de la microcuenca El Coyolito, se observa que existe una mortalidad de plantas de pino años posterior al establecimiento; sin embargo, se desconoce el porcentaje de sobrevivencia. En cuanto a la parte alta, también se desconoce el porcentaje de sobrevivencia; además, existe la posibilidad de mayor presencia de plantas de pino provenientes de la regeneración aun siendo una microcuenca bajo plantación.

En cuanto a ambas partes de las microcuencas, la parte baja presenta una mayor cantidad de brinzales; aunque, en la parte alta se encuentran una mayor cantidad de plantas de pino, fustales y latizales. Sin embargo, en la microcuenca Las Guamas se observa menor cantidad de árboles de pino y en ambas partes de la cuenca, en comparación a quebrada El Coyolito (plantación). Por otro lado, en ambas partes de la microcuenca El Coyolito hay muy baja cantidad de vegetación menor (pastos y gramíneas) y no se presentan brinzales, debido a los incendios ocurridos. Entre las especies de vegetación encontradas en las microcuencas están, Nance de Montaña (*Byrsonima crassifolia*), Guayabos (*Psidium guajava*) y Encinos (*Quercus sp.*).

Cuadro 14

Comparación de usos y coberturas mediante muestras in situ en la parte baja y alta de las microcuencas El Coyolito y Las Guamas

Cobertura y características	Parte baja		Parte alta	
	Q. Coyolito (Plantación)	Q. las Guamas (Regeneración natural)	Q. Coyolito (Plantación)	Q. las Guamas (Regeneración natural)
Numero de plantas de pino/hectárea	533	0	3,067	800
Altura promedio de planta de pino (cm)	310.25	0	399.61	403.33
DAP de plantas de pino (cm)	5.25	0	5.36	7.95
Fustales y otras especies latifoliadas por hectáreas	0	0	0	267
Altura promedio de los fustales (cm)	0	0	0.00	560.00
DAP de fustales (cm)	0	0	0.00	14.25

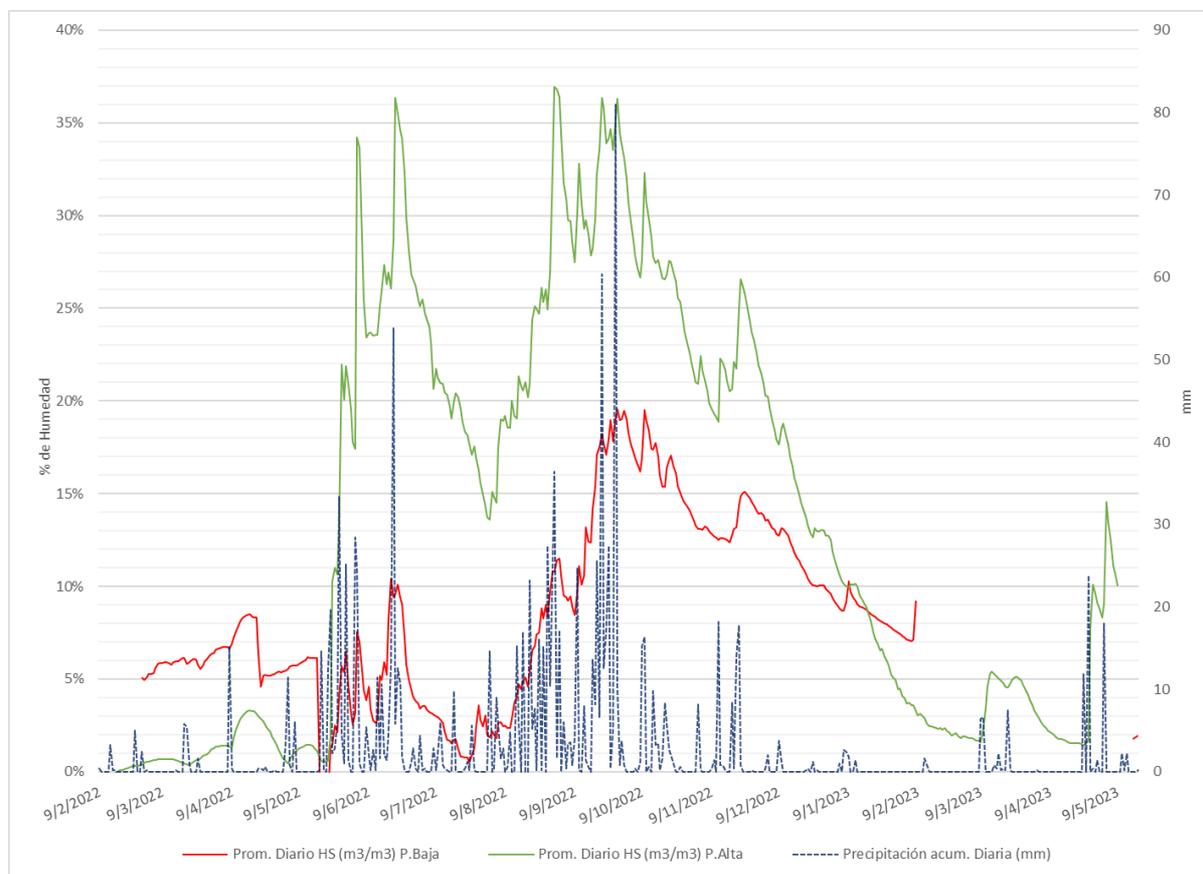
Cobertura y características	Parte baja		Parte alta	
	Q. Coyolito (Plantación)	Q. las Guamas (Regeneración natural)	Q. Coyolito (Plantación)	Q. las Guamas (Regeneración natural)
Latizales y otras especies latifoliadas por hectáreas	400	0	2,000	400
Altura promedio de los latizales (cm)	380	0	4.86	3.87
DAP de latizales (cm)	7.17	0	6.53	5.67
Brinzales/hectárea	1,667	3,333	0	5,000
Altura promedio de brinzales (cm)	65.5	32.5	0.00	24.17
Peso gramíneas y vegetación menor en húmedo (ton/ha)	0.10	1.57	0.03	0.90
Peso gramíneas y vegetación menor en seco (ton/ha)	0.06	1.42	0.01	0.78

Retención de Humedad en el Suelo

En la microcuenca quebrada del Plan (tratamiento), la retención de la humedad de suelo (HS) presenta una relación respecto a la precipitación; puesto que, luego del registro de un evento de precipitación existe respuesta con aumento en la humedad de suelo (Figura 22). De igual forma, la humedad de suelo tiende a disminuir progresivamente cuando no se presentan precipitaciones o son muy leves. Cabe mencionar que la humedad de suelo en la parte alta reporta una mayor retención a diferencia de la parte baja de la microcuenca. Además, se puede observar que posterior a un evento de mayor magnitud de precipitación, se presenta una respuesta en picos en la humedad del suelo en la parte alta.

Figura 22

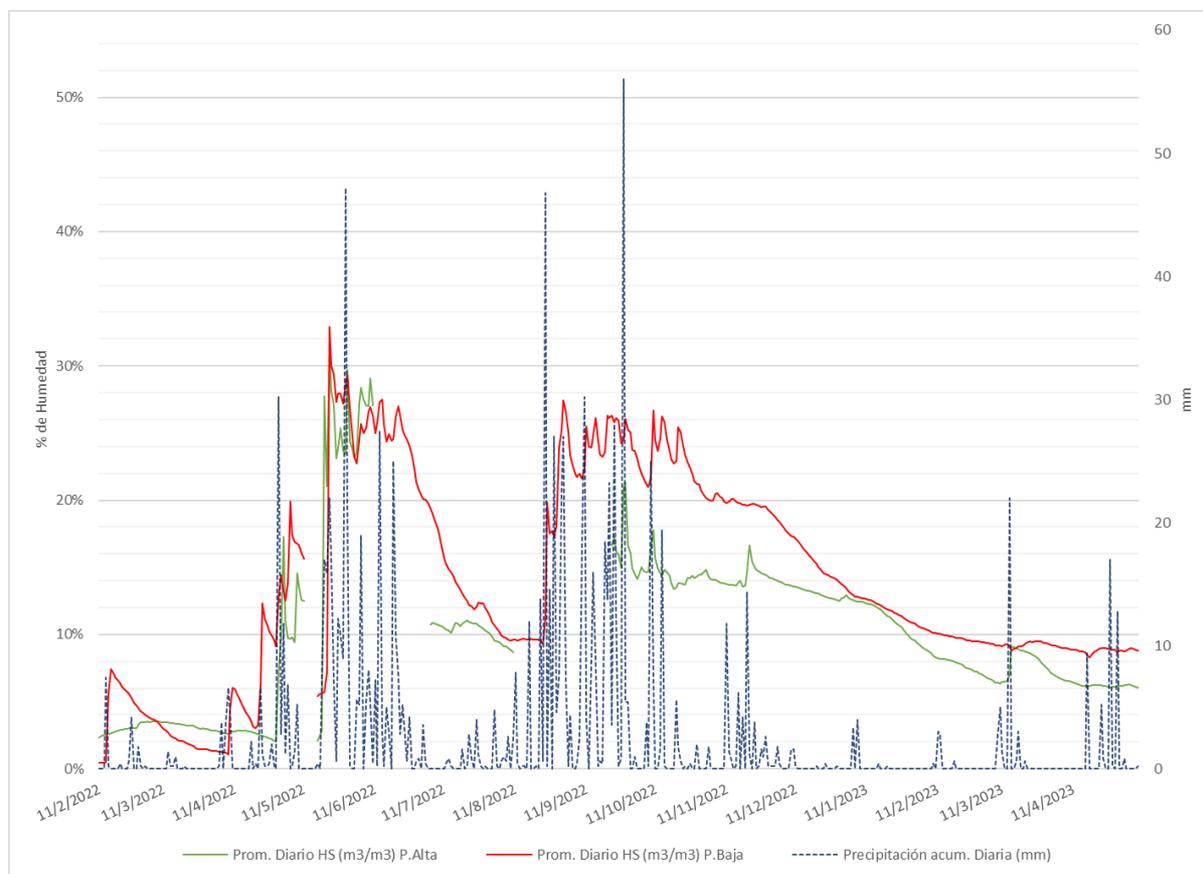
Evolución en la retención de la humedad de suelo de la microcuenca quebrada del Plan



Por su parte, en la microcuenca Cupiles de Quiles (control) también presenta una relación entre la retención de humedad de suelo y la precipitación, al mostrar un aumento luego de un evento de lluvia y la reducción progresiva cuando disminuye la precipitación o se ausenta (Figura 23). Sin embargo, aunque existan mayores picos de humedad en la parte alta, principalmente en inicios de la época lluviosa, en la parte baja la humedad del suelo tiende a mantenerse más estable e incrementar gradualmente a diferencia de la parte alta. Igualmente, la humedad en la parte baja entre finales de julio a enero reporta una tendencia mayor que en la parte alta, siguiendo esta tendencia durante la época seca, como se puede observar en los inicios de la toma de datos.

Figura 23

Evolución en la retención de la humedad de suelo de la microcuenca quebrada Cupiles de Quiles

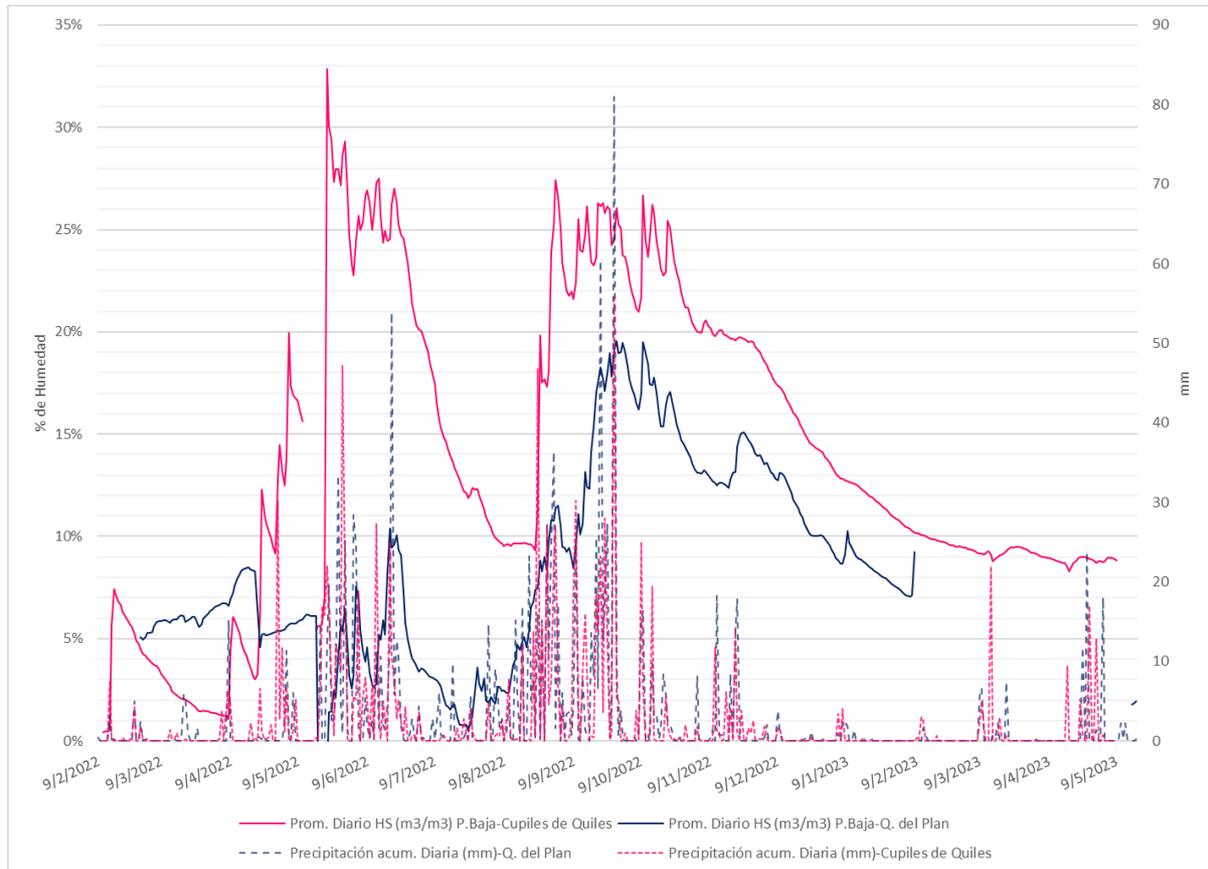


La microcuenca de control Cupiles de Quiles que está bajo regeneración natural presenta una retención más homogénea de humedad de suelo en ambas partes de la microcuenca en comparación a la microcuenca en tratamiento quebrada del Plan con reforestación, siendo en esta mayor la humedad en la parte alta. Al comparar la parte baja de las microcuencas del Plan y Cupiles, se puede observar que la quebrada Cupiles de Quiles (control) muestra una mayor retención de humedad de suelo (Figura 24). Además, ambas microcuencas presentan un aumento en la humedad de suelo durante la época de lluvias y una disminución de la humedad durante periodos sin lluvia o precipitación mínima (0 - < 7 mm).

Figura 24

Evolución en la retención de la humedad de suelo en la parte baja de la microcuenca Q. del Plan y Q.

Cupiles de Quiles

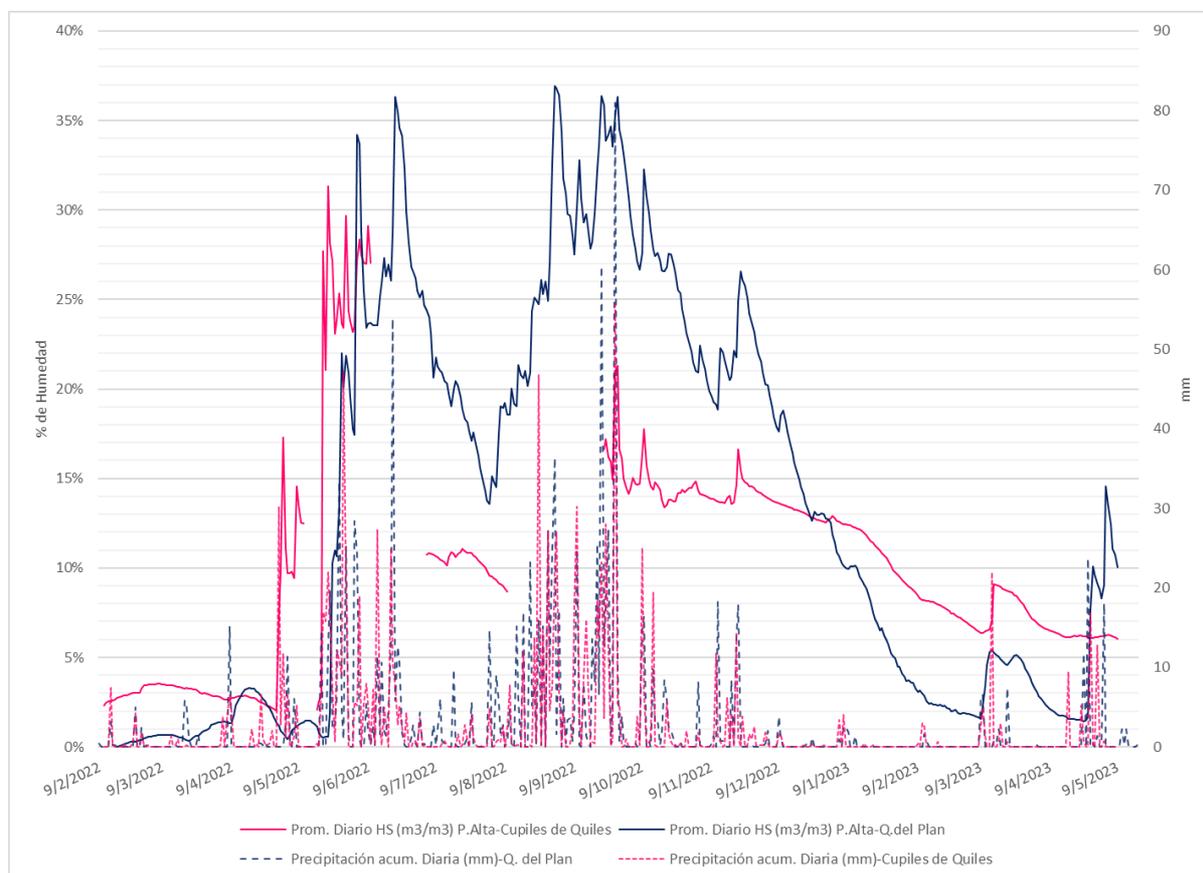


Por otra parte, la parte alta de las microcuencas del Plan y Cupiles, se puede observar que en ambas microcuencas la retención de humedad de suelo es muy similar (Figura 25). Además, ambas microcuencas presentan un aumento en la humedad de suelo durante la época de lluvias, y una disminución de la humedad durante periodos sin lluvia o precipitación mínima.

Figura 25

Evolución en la retención de la humedad de suelo en la parte alta de la microcuencia Q. del Plan y Q.

Cupiles de Quiles



Este comportamiento en la humedad puede ser causado principalmente por la cobertura vegetal presente; ya que, en la parte baja de la microcuencia Cupiles de Quiles (control) se observa una mayor densidad de vegetación secundaria (72,500 brinzales/ha) que la quebrada del Plan (plantación). Sin embargo, en la parte alta de la quebrada del Plan se presenta una mayor densidad de vegetación de brinzales (17,500/ha) y vegetación secundaria menor (ton biomasa/ha) (pastos y gramíneas), en comparación con Cupiles de Quiles.

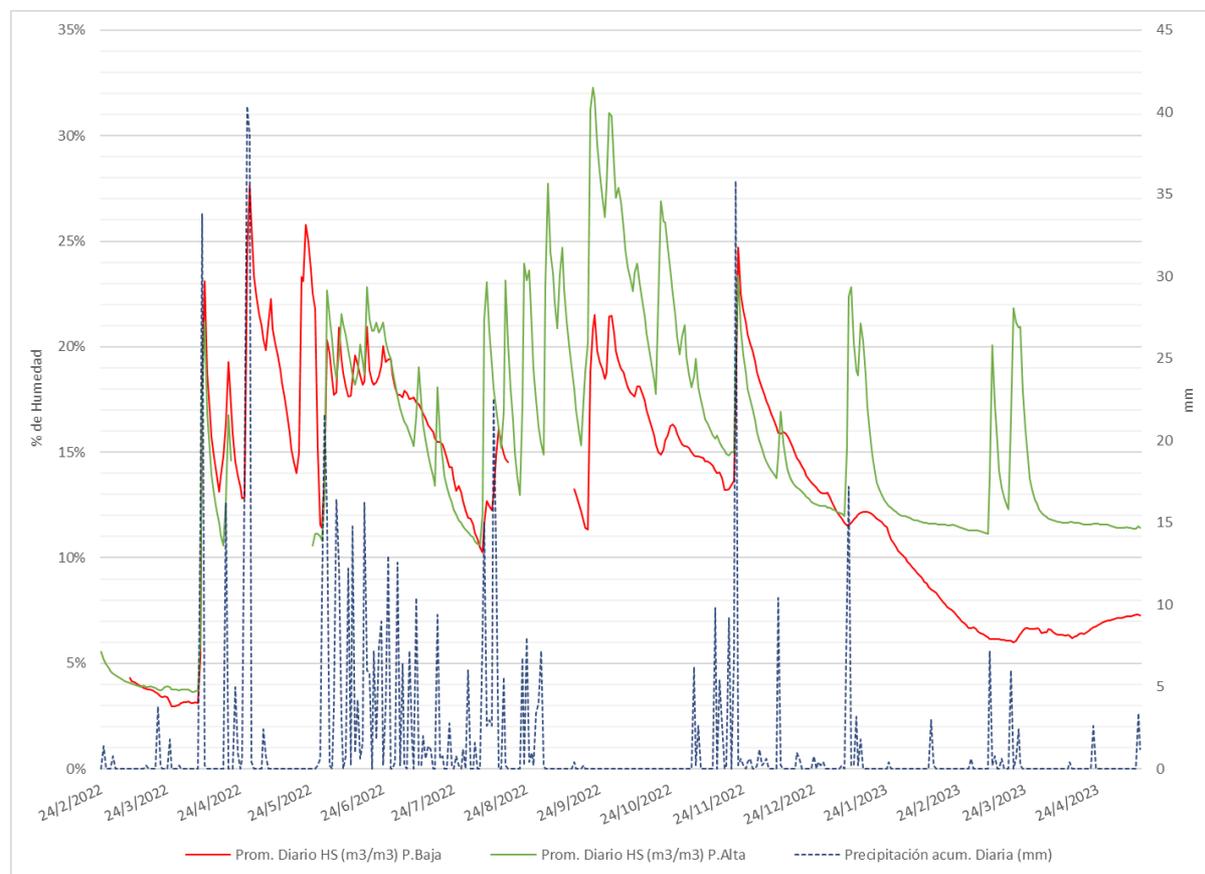
En la microcuencia quebrada Coyolito (tratamiento) se presenta una relación entre la retención de humedad de suelo y la precipitación al reportar un aumento luego de un evento y la disminución progresiva cuando existe una disminución en la precipitación (Figura 26). Cabe mencionar

que la humedad de suelo en la parte alta tiende a presentar picos más altos luego de cada lluvia y a retener un poco más de humedad en el suelo, a diferencia de la parte baja de la microcuenca. Sin embargo, los picos que se presentan en la parte alta experimentan fluctuaciones en respuesta a las precipitaciones, aumentando considerablemente y luego disminuyendo en gran medida después de cada evento. Este fenómeno puede causarse por factores como el estado de humedad previo a la precipitación, la posición topográfica y la profundidad del estrato del suelo (Tenelanda-Patiño et al., 2018).

En esta microcuenca, tanto en la época seca como en la época húmeda, se puede observar que la parte alta presenta una ligera tendencia hacia una mayor retención de humedad de suelo. El motivo de esta tendencia puede ser debido a que en la parte alta existe una mayor densidad de vegetación (3,067 pino/ha y 2,000 latizales/ha) que en la parte baja.

Figura 26

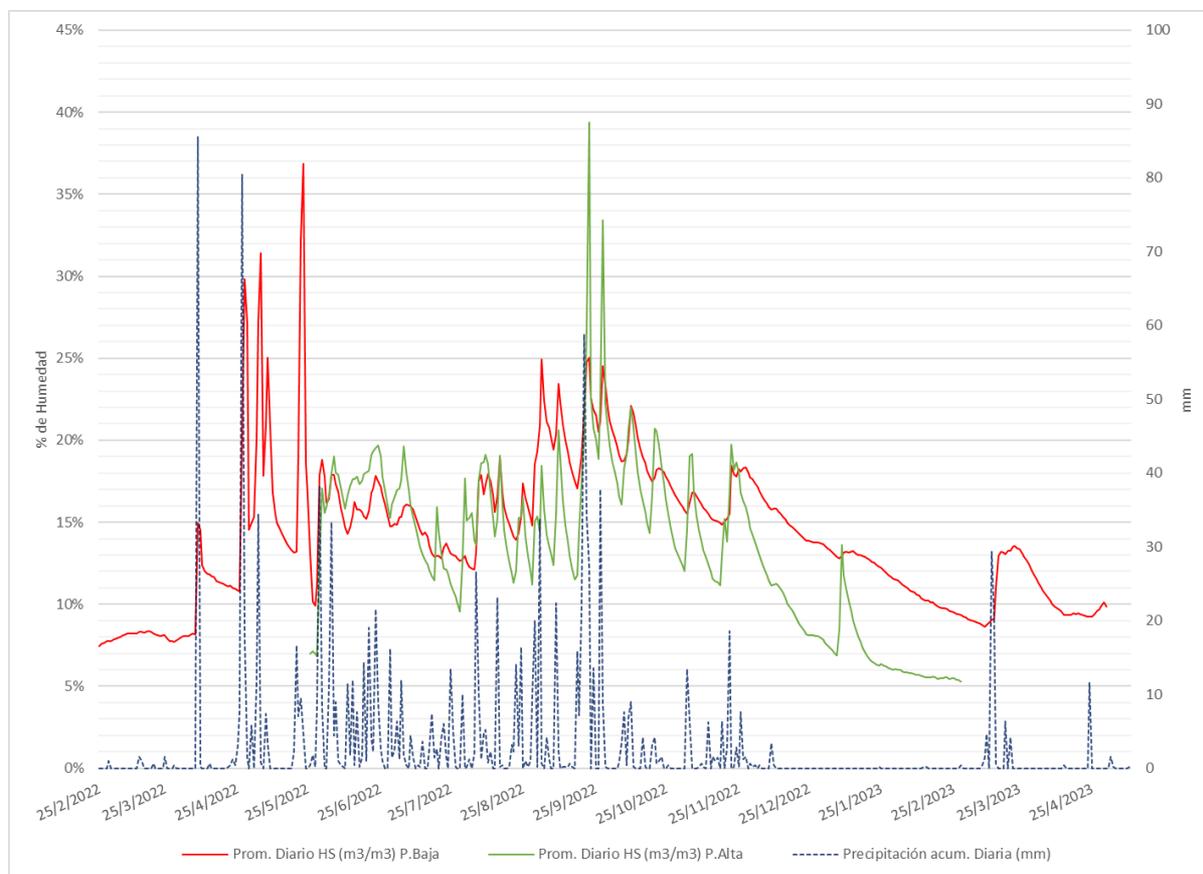
Evolución en la retención de la humedad de suelo de la microcuenca quebrada El Coyolito



En la microcuenca Las Guamas (control), también existe una relación entre la retención de humedad de suelo y la precipitación al presentar un aumento luego de un evento de lluvia y la disminución progresiva cuando no hay lluvias o son de menor magnitud (Figura 27). Por otro lado, se presentan varios picos de retención de humedad de mayor magnitud en la parte alta que en la parte baja. Sin embargo, aunque existan mayores picos de humedad en la parte alta principalmente, en la parte baja, la humedad tiende a mantenerse más estable en contraste con la parte alta. De igual forma, los picos menores se observan en la parte alta. Además, en durante los primeros cuatro meses de la época seca (diciembre – marzo), se puede observar que la humedad es mayor y más constante en la parte baja que en la parte alta de la microcuenca; debido a la mayor presencia cobertura vegetal menor (1.42 ton/ha).

Figura 27

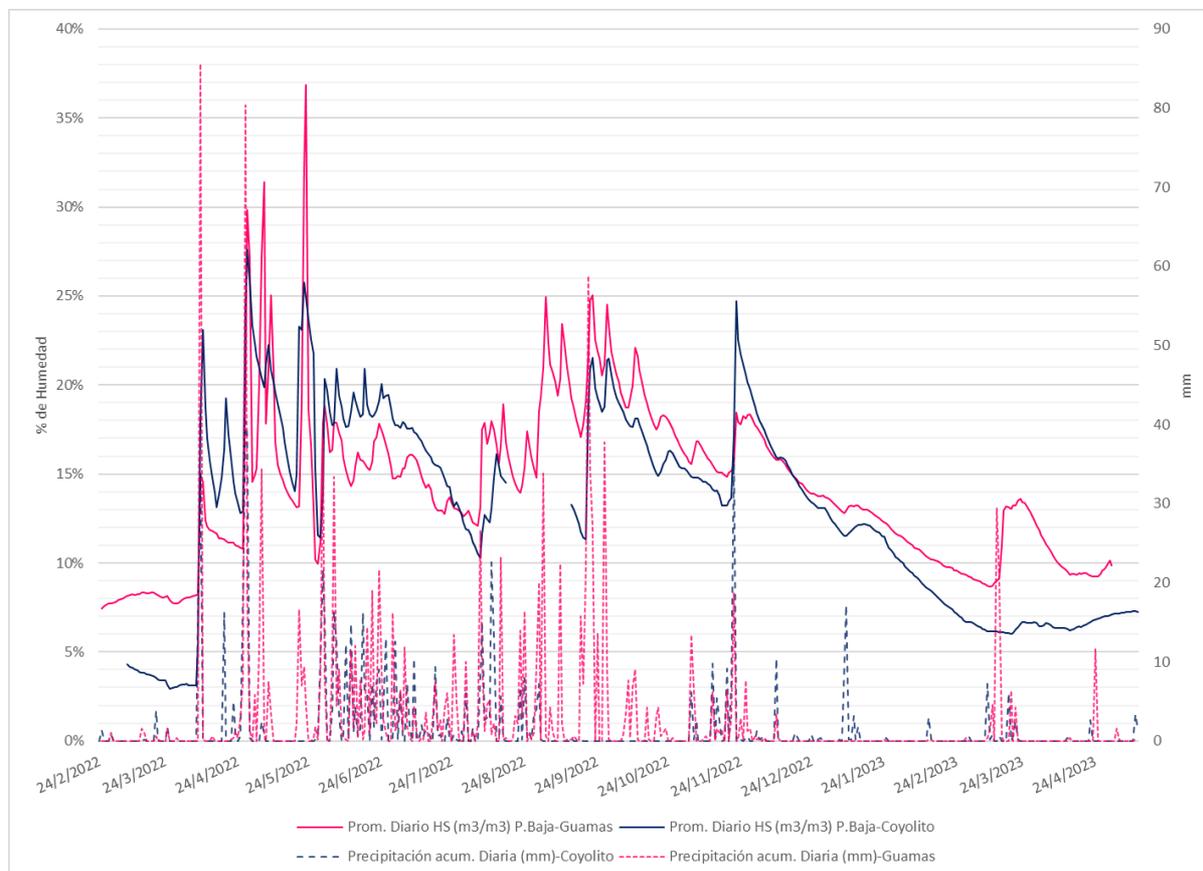
Evolución en la retención de la humedad de suelo de la microcuenca quebrada Las Guamas



Al comparar la parte baja de las microcuencas El Coyolito y Las Guamas, se puede observar que en ambas microcuencas la retención de humedad de suelo es muy similar (Figura 28), siendo Las Guamas, la que presenta picos más altos de humedad. Además, ambas microcuencas presentan un aumento en la humedad de suelo durante la época de lluvias y una disminución de la humedad durante periodos seca o precipitación mínima.

Figura 28

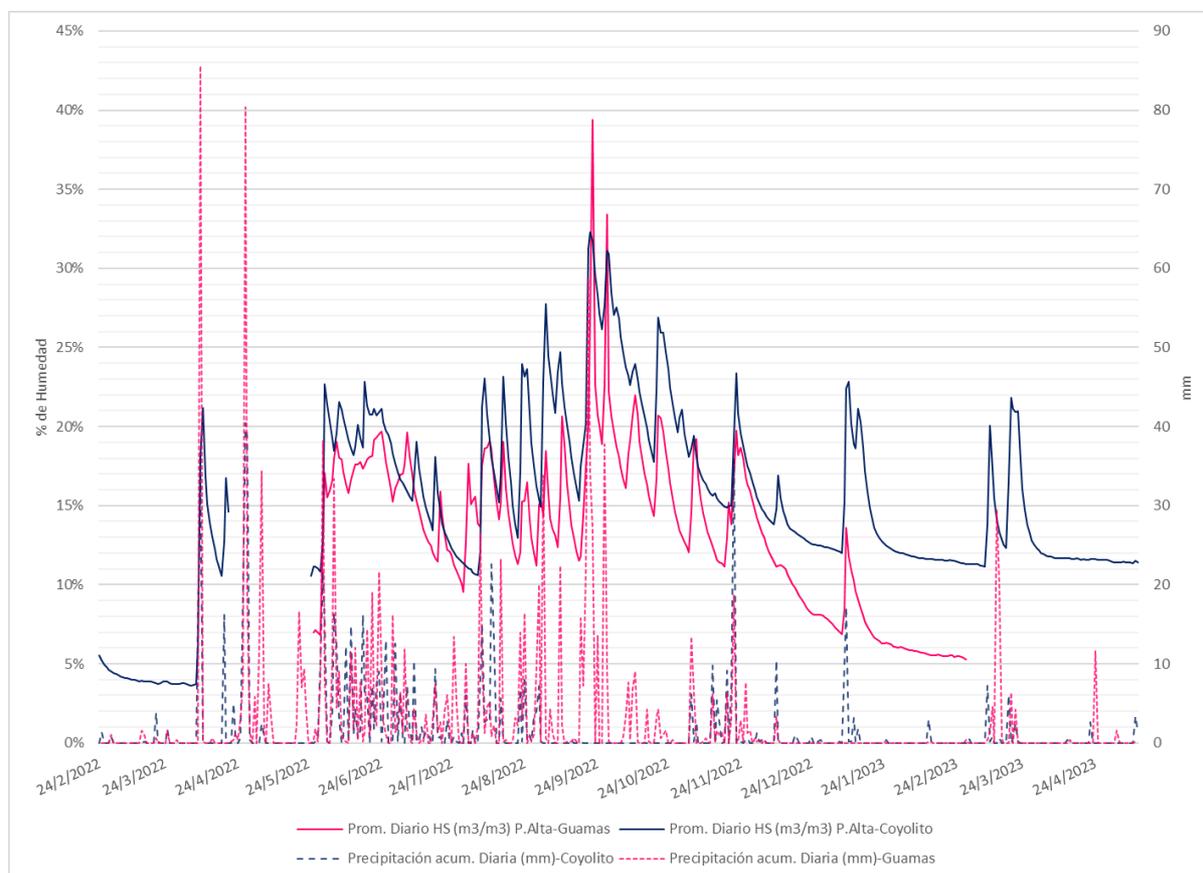
Evolución en la retención de la humedad de suelo en la parte baja de la microcuenca El Coyolito y Las Guamas



Por otra parte, también en la parte alta de las microcuencas del El Coyolito y Las Guamas se puede observar que en ambas microcuencas la retención de humedad de suelo es muy similar (Figura 29). Además, ambas microcuencas presentan un aumento en la humedad de suelo durante la época húmeda, y una disminución de la humedad durante periodos de escasa o nula precipitación.

Figura 29

Evolución en la retención de la humedad de suelo en la parte alta de la microcuenca El Coyolito y Las Guamas



Tanto en las partes alta como baja de las microcuencas El Coyolito y Las Guamas, se puede observar una retención de humedad de suelo muy similar. Este comportamiento en la humedad puede ser atribuido a la cobertura vegetal presente, a pesar de que esta varía entre ambas partes de las microcuencas; siendo principalmente secundaria y menor en la parte baja de Las Guamas, y en la parte alta El Coyolito más densidad de pino y latizales.

Cabe destacar, que, entre ambos pares de microcuenca, las unidades bajo tratamiento presentan una retención de humedad mayor que en las partes bajas, ya que presentan valores más altos y constantes, a diferencia de las microcuencas de control.

Comparación de Humedad de Suelo en Microcuencas

Al realizar la medición de humedad de suelo en las parte alta y baja del área afectada de ambos pares de microcuencas, los datos obtenidos presentan una correlación espacial y no presentan una distribución lineal. Por tanto, los datos fueron analizados utilizando el modelo estadístico: Lineal Generalizado Mixto (MLGM), dividiendo el error ($p \leq 0.05$) en dos componentes (fijo y aleatorio). Uno de ellos es la correlación espacial con las variables del tipo de vegetación (plantación y regeneración natural) y la segunda toma en cuenta la precipitación, temperatura como covariables.

En cuanto a la retención de humedad en la parte alta del área afectada de las microcuencas del Plan y Cupiles de Quiles, el análisis de varianza resultante indicó que si existe diferencias significativas ($p < 0.001$), es decir que las covariables de precipitación, y temperatura tienen un efecto significativo sobre la humedad de suelo (Cuadro 15). Igualmente, el tipo de cobertura presenta diferencias significativas ($p > 0.0156$), siendo la variable con menos significancia.

Asimismo, de acuerdo con la separación de medias, estadísticamente existe mayor retención de humedad de suelo en la parte alta de la microcuenca Cupiles de Quiles que se encuentra bajo regeneración natural (Cuadro 16). Sin embargo, la diferencia de medias no es muy notoria, lo que sugiere que ambas microcuencas podrían tener una retención de humedad muy similares en la parte alta.

En cuanto a la parte, el análisis de varianza resultante indicó que si existe diferencias significativas ($p < 0.001$), es decir que la variable de tipo de vegetación y la covariable de temperatura tienen un efecto significativo sobre la humedad de suelo (Cuadro 15). Igualmente, la precipitación presenta diferencias significativas ($p < 0.041$), siendo esta la covariable que tuvo menos significancia.

Asimismo, se pueden observar una diferencia significativa en la retención de humedad del suelo en la parte baja, indicando que la microcuenca Cupiles de Quiles que se encuentra bajo regeneración natural tiene mayor retención de humedad que la microcuenca del Plan (Cuadro 16).

Este resultado puede ser causado por la cobertura vegetal presente, la cual es principalmente secundaria (72,500 brinzales/ha), favoreciendo la retención de humedad.

Resultados similares se pueden observar en la investigación de García-Leoz et al. (2018), quienes indican que en bosques maduros, altos y densos, existe una reducción en la disponibilidad de humedad en el suelo, causado por varios factores como la intercepción de precipitación y la evapotranspiración. En contraste, mencionan que en un bosque con una cobertura vegetal durante las etapas iniciales de sucesión (vegetación secundaria y menor principalmente), estas son más efectivas como reguladores hidrológicos; en otras palabras, son capaces de una mayor retención de humedad en el suelo.

Cuadro 15

Análisis de Varianza de la parte baja y alta del área afectada de las microcuencas quebrada del Plan y quebrada Cupiles de Quiles

Covariables	Parte Baja		Parte alta	
	Valor-F	Valor-p	Valor-F	Valor-p
Tipo de cobertura	3,928.12	<0.0001	5.84	0.156
Temperatura (°C)	1,375.17	<0.0001	2,620.34	<0.0001
Precipitación (mm)	8.23	0.0041	17.89	<0.0001

Cuadro 16

Comparación de la parte baja y alta del área afectada de las microcuencas quebrada del Plan y quebrada Cupiles de Quiles

Microcuenca	Parte Baja		Parte alta	
	Media		Media	
Q. del Plan	0.084	B	0.118	B
Q. Cupiles de Quiles	0.146	A	0.121	A

Respecto a la retención de humedad en la parte alta del área afectada de las microcuencas El Coyolito y Las Guamas; el análisis de varianza resultante indicó que si existe diferencias significativas ($p < 0.001$), es decir que la variable de tipo de vegetación y las covariables de temperatura y

precipitación tienen un efecto significativo sobre la humedad de suelo (Cuadro 17). Asimismo, se puede observar estadísticamente que existe mayor retención de humedad de suelo en la parte alta de la microcuenca El Coyolito que se encuentra bajo plantación (Cuadro 18). Este resultado puede ser causado debido a que la cobertura vegetal en el área tiene una mayor presencia de plantas de pino que en la quebrada Las Guamas. No obstante, la diferencia de medias no es muy notoria, lo que indica que ambas microcuencas podrían presentar una retención de humedad muy similares en la parte alta.

De acuerdo con Wei et al. (2022) en su investigación indican que comportamiento de la humedad de suelo en un bosque joven establecido con plantación mediante regeneración natural asistida presenta en el primer año de desarrollo una mayor retención de humedad en comparación de un bosque secundario maduro y una plantación forestal. Asimismo, en el tercer año el bosque con regeneración natural asistida presenta una retención significativamente mayor que un bosque establecido por plantación; además, llegando incluso al nivel del bosque secundario maduro.

En cuanto a la parte baja, los resultados indican que si existe diferencias significativas ($p < 0.001$), es decir que las variables de tipo de vegetación y temperatura tienen un efecto significativo sobre la humedad de suelo (Cuadro 17). Igualmente, la precipitación presenta diferencias significativas ($p < 0.0463$), siendo esta la covariable que tuvo menos significancia. Asimismo, se puede observar estadísticamente que existe mayor retención de humedad de suelo en la parte baja de la microcuenca Las Guamas que se encuentra bajo regeneración natural (Cuadro 18). Este resultado puede ser causado por la vegetación, al presentar mayor cantidad de vegetación secundaria (3,333 brinzales/ha) y menor (1.42 ton biomasa/ha). Sin embargo, la diferencias en las medias no son muy notorias, lo que sugiere que ambas microcuencas podrían tener niveles de retención de humedad bastante similares en la parte baja.

Cuadro 17

Análisis de Varianza de la parte baja y alta del área afectada de las microcuencas quebrada El

Coyolito y Las Guamas

Covariables	Parte Baja		Parte alta	
	Valor-F	Valor-p	Valor-F	Valor-p
Tipo de cobertura	139.22	<0.0001	579.42	<0.0001
Temperatura (°C)	3,700.86	<0.0001	4,718.57	<0.0001
Precipitación (mm)	3.97	0.0463	19.06	<0.0001

Cuadro 18

Comparación de la parte baja y alta del área afectada de las microcuencas quebradas El Coyolito y

Las Guamas

Microcuenca	Parte Baja		Parte alta	
	Media		Media	
Q. El Coyolito	0.14	B	0.15	A
Q. Las Guamas	0.15	A	0.13	B

De esta forma, en el primer par, la microcuenca bajo regeneración natural, Cupiles de Quiles, tuvo mayor retención de humedad que la microcuenca del Plan bajo tratamiento por plantación de pino. En el segundo par, tanto la microcuenca bajo plantación, El Coyolito, como la de regeneración natural, Las Guamas, tuvieron una retención de humedad similar.

Conclusiones

Las cuatro microcuencas poseen una forma oblonga influyendo en un mayor tiempo de concentración hídrica, con cobertura forestal dominante por el bosque de pino. El área afectada por plaga se localiza en las partes media y alta de ambos pares de microcuencas; proporcionalmente es muy similar en las microcuencas del Plan y Cupiles de Quiles, mientras entre el Coyolito y Las Guamas se observó una diferencia del 20%. Asimismo, los muestreos de suelos localizados indicaron que la textura fue principalmente franco arenoso en ambas partes del área afectada de las microcuencas, influyendo en una retención de humedad baja-moderada.

Los registros de humedad de suelo indican que en la microcuenca bajo regeneración natural (Cupiles de Quiles), hay mayor retención de humedad en el suelo en comparación con la microcuenca bajo plantación (del Plan). Por otro lado, tanto la microcuenca bajo plantación (El Coyolito) como la microcuenca bajo regeneración natural (Las Guamas) mostraron una retención de humedad muy similar, lo cual puede ser atribuido a la presencia de vegetación en ambas microcuencas.

Recomendaciones

Continuar con la evaluación de las microcuencas de estudio, por lo menos por un periodo de 3 a 5 años más, con cortes anuales para observar la respuesta de la humedad de suelo con respecto al crecimiento de las áreas restauradas con plantación forestal de pino y regeneración natural.

Realizar un inventario forestal con mayor número de parcelas distribuidas en todas las áreas del estudio que permita evaluar el estado de la plantación y el porcentaje de sobrevivencia de cobertura de pino en las microcuencas del Plan y El Coyolito luego de varios años de establecimiento. De igual forma, realizar una evaluación de la regeneración natural en las microcuencas Cupiles de Quiles y Las Guamas.

Realizar ensayos de infiltración distribuidos en las áreas de estudio utilizando anillos concéntricos o infiltrómetros. De esta forma, se podrá incluir la variable de infiltración en el estudio para soportar mejor los resultados puntuales de los sensores de humedad de suelo.

Con 2 años de registros y tomando en cuenta los resultados evaluados en este estudio, se propone revisar la ubicación de algunos de los sensores, principalmente en las microcuencas bajo tratamiento de plantación. Dado que, según verificación de campo, la ubicación actual ha sufrido alteración en la cobertura por daños de incendios forestales u otros usos como pastoreo de ganado y esto puede alterar resultados.

Elaborar un nuevo plan y protocolo para la instalación y toma de datos de caudales con los sensores ya instalados mediante registro de la altura de la lámina de agua en los puntos definidos del cauce principal de las cuatro microcuencas, así como también utilizar instrumentos de mayor precisión u otras formas de medición directa de caudales. De esta forma se podrá calibrar cada sección para evaluar el comportamiento hidrológico mediante los caudales a partir del tercer año en cada microcuenca.

Referencias

- Abiy, A. Z. y Melesse, A. M. (2017). Evaluation of watershed scale changes in groundwater and soil moisture storage with the application of GRACE satellite imagery data. *CATENA*, 153, 50–60. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.01.036>
- Altaf, F., Meraj, G. y Romshoo, S. A. (2013). Morphometric Analysis to Infer Hydrological Behaviour of Lidder Watershed, Western Himalaya, India. *Geography Journal*, 2013, 1–14. <https://doi.org/10.1155/2013/178021>
- Bandera-Fernández, E. y Pérez-Pelea, L. (2018). Los modelos lineales generalizados mixtos. Su aplicación en el mejoramiento de plantas. *Cultivos Tropicales*, 39(1), 127–133. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=193260614019>
- Barrantes, E. y Méndez, V. (2016). Riqueza del recurso hídrico y su relación con la cubierta vegetal en la Reserva Forestal Grecia, Alajuela, Costa Rica. *Cuadernos De Investigación UNED*, 8(1), 8–12. <https://www.scielo.sa.cr/pdf/cinn/v8n1/1659-4266-cinn-8-01-00008.pdf>
- Campbell, J., Yanai, R., Green, M., Likens, G., See, C., Bailey, A., Buso, D. y Yang, D. (2016). Uncertainty in the net hydrologic flux of calcium in a paired-watershed harvesting study. *Ecosphere*, 7(6), 1–15. <https://doi.org/10.1002/ecs2.1299>
- Clausen, J. y Spooner, J. (1993). *Paired watershed study design* (núm. PB-94-154820/XAB; EPA-841/F-93/009). Environmental Protection Agency, Washington, DC (United States). Office of Wetlands, Oceans and Watersheds. <https://www.osti.gov/biblio/7207219>
- Comisionado Nacional de los Derechos Humanos. (2016). *El gorgojo descortezador del pino y otras graves amenazas ambientales a la vida digna de los hondureños y hondureñas*. Honduras. Comisionado Nacional de los Derechos Humanos (CONADEH). <http://app.conadeh.hn/descargas/InformesEspeciales/Informe-Especial-Gorgojo-del-Pino-y-Amenazas-Ambientales.pdf>
- Consorcio Poma Quindío. (2018). *Caracterización de la Cuenca del Río la Vieja - Plan de ordenación y manejo de la Cuenca del Río la Vieja: Morfometría*. Bogotá. https://www.cvc.gov.co/sites/default/files/Planes_y_Programas/Planes_de_Ordenacion_y_Manejo_de_Cuencas_Hidrografica/La%20Vieja%20-%20POMCA%20en%20Ajuste/Fase%20Diagnostico/7_CapituloI_Diagnostico_Morfometria.pdf
- Córdoba-González, J. (2021). *Efectos de los cambios en la cobertura vegetal de la cuenca del Amazonas en la evapotranspiración regional: Análisis de simulaciones con el modelo de superficie NoahMP* [Tesis]. Universidad de Antioquia, Medellín. https://bibliotecadigital.udea.edu.co/dspace/bitstream/10495/20490/7/CordobaYeniffer_2021_EfectosDeforestacionEvapotranspiracion.pdf
- Dhar, A., Parrott, L. y Heckbert, S. (2016). Consequences of mountain pine beetle outbreak on forest ecosystem services in western Canada. *Canadian Journal of Forest Research*, 46(8), 987–999. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2016-0137>
- García-Leoz, V., Villegas, J. C., Suescún, D., Flórez, C. P., Merino-Martín, L., Betancur, T. y León, J. D. (2018). Land cover effects on water balance partitioning in the Colombian Andes: improved

- water availability in early stages of natural vegetation recovery. *Regional Environmental Change*, 18(4), 1117–1129. <https://doi.org/10.1007/s10113-017-1249-7>
- Gómez, J. (2011). Regeneración natural de nueve especies maderables en un bosque intervenido de la Amazonia Boliviana. *Acta Amazonica*, 41(1), 135–142. <https://doi.org/10.1590/S0044-59672011000100016>
- Hernández, J. (2016). *Análisis de infiltración hídrica y cambios en la cobertura del bosque mesófilo en la cuenca alta del Río Opalita mediante imágenes satélite* [Tesis de maestría]. Instituto Politécnico Nacional, México. http://literatura.ciidiroaxaca.ipn.mx:8080/xmlui/handle/LITER_CIIDIROAX/264
- Instituto Nacional de Conservación Forestal, Áreas Protegidas y Vida Silvestre. (2017). *Informe de episodio de ataque del gorgojo descortezador del pino (Dendroctonus frontalis) en Honduras, 2014-2017*. <https://1library.co/document/q07w289z-informe-episodio-ataque-gorgojo-descortezador-dendroctonus-frontalis-honduras.html>
- Instituto Nacional de Estadística Honduras. (2019). *Boletín cobertura forestal 2015 - 2019*. <https://www.ine.gob.hn/V3/imag-doc/2020/12/Cobertura-Forestal-2015-2019.pdf>
- Jaramillo, A. V. (2013). *Caracterización preliminar de la geomorfología e hidrología de la microcuenca del río Irquis, parroquia victoria del Portete, cantón Cuenca –provincia del Azuay* [Tesis]. Escuela Politécnica del Ejército, Sangolqui. <https://docplayer.es/91127335-Escuela-politecnica-del-ejercito-vice-rectorado-de-investigacion-y-vinculacion-con-la-colectividad.html>
- Jobbágy, E., Acosta, A. y Noretto, M. (2013). Rendimiento hídrico en cuencas primarias bajo pastizales y plantaciones de pino de las sierras de Córdoba (Argentina). *Ecología Austral*, 23(2), 87–96. <https://doi.org/10.25260/ea.13.23.2.0.1164>
- Ladekarl, U. L., Nørnberg, P., Rasmussen, K. R., Nielsen, K. E. y Hansen, B. (2001). Effects of a heather beetle attack on soil moisture and water balance at a Danish heathland. *Plant and Soil*, 229(1), 147–158. <https://doi.org/10.1023/A:1004887007230>
- Libohova, Z., Seybold, C., Wysocki, D., Wills, S., Schoeneberger, P., Williams, C., Lindbo, D., Stott, D. y Owens, P. R. (2018). Reevaluating the effects of soil organic matter and other properties on available water-holding capacity using the National Cooperative Soil Survey Characterization Database. *Journal of Soil and Water Conservation*, 73(4), 411–421. <https://doi.org/10.2489/jswc.73.4.411>
- Loftis, J., MacDonald, L., Streett, S., Iyer, H. y Bunte, K. (2001). Detecting cumulative watershed effects: the statistical power of pairing. *Journal of Hydrology*, 251(1-2), 49–64. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(01\)00431-0](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00431-0)
- Louman, B., Quirós, D. y Nilsson, M. (2001). *Silvicultura de bosques latifoliados húmedos con énfasis en América Central* (Vol 46).
- Martínez, E., Coello, C. y Feyen, J. (2017). Análisis comparativo del comportamiento de la escorrentía de tres microcuencas andinas con diferente régimen de precipitación y cobertura vegetal. *MASKANA*, 8(1), 129–144. <https://doi.org/10.18537/mskn.08.01.12>
- Martínez-González, F., Sosa-Pérez, F. y Ortiz-Medel, J. (2010). Comportamiento de la humedad del suelo con diferente cobertura vegetal en la Cuenca La Esperanza. *Tecnología Y Ciencias Del*

- Agua*, 1(4), 89–103. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=s2007-24222010000400005
- Mejía, A. (2022). *Efecto de la restauración forestal en la humedad de suelo en microcuencas afectadas por Gorgojo Descortezador de Pino (Dendroctonus frontalis) en la Región Central de Honduras* [Tesis]. Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras. <https://bdigital.zamorano.edu/bitstreams/cdda8167-c977-4a21-bfae-47d7cebb168a/download>
- Organización De Las Naciones Unidas Para La Agricultura Y La Alimentación. (1969). *Los Suelos de Honduras*. <https://www.fao.org/3/ar884s/ar884s.pdf>
- Penn, C. A., Bearup, L. A., Maxwell, R. M. y Clow, D. W. (2016). Numerical experiments to explain multiscale hydrological responses to mountain pine beetle tree mortality in a headwater watershed. *Water Resources Research*, 52(4), 3143–3161. <https://doi.org/10.1002/2015WR018300>
- Petrakis, R., Norman, L., Vaughn, K., Pritzlaff, R., Weaver, C., Rader, A. y Pulliam, H. (2021). Hierarchical Clustering for Paired Watershed Experiments: Case Study in Southeastern Arizona, U.S.A. *Water*, 13(21), 2955. <https://doi.org/10.3390/w13212955>
- Ray, G., Ochoa, C. G., Deboodt, T. y Mata-Gonzalez, R. (2019). Overstory–understory Vegetation Cover and Soil Water Content Observations in Western Juniper Woodlands: A Paired Watershed Study in Central Oregon, USA. *Forests*, 10(2), 151. <https://doi.org/10.3390/f10020151>
- Rivera, S. (2021). *Consultoría de apoyo en la instrumentalización para el monitoreo del indicador hídrico de los proyectos BID 3878/BL-HO y HO-L1200/HO-G1252: Producto No. 2 - Reporte de asesoramiento en la selección de las 6 microcuencas*.
- Ssegane, H., Amatya, D., Chescheir, G., Skaggs, W., Tollner, E. y Nettles, J. (2013). Consistency of Hydrologic Relationships of a Paired Watershed Approach. *American Journal of Climate Change*, 02(02), 147–164. <https://doi.org/10.4236/ajcc.2013.22015>
- Sun, G., Zuo, C., Liu, S., Liu, M., McNulty, S. G. y Vose, J. M. (2008). Watershed Evapotranspiration Increased due to Changes in Vegetation Composition and Structure Under a Subtropical Climate 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 44(5), 1164–1175. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2008.00241.x>
- Taiwan International Cooperation and Development Fund. (2018). *Proyecto de gestión de plagas forestales en Honduras: Centro de Investigación espacial y teledetección*. Universidad Nacional Central de Taiwán. https://icf.gob.hn/wp-content/uploads/2021/05/proposal_HondurasICF-ICDF-NCU.pdf
- Tenelanda-Patiño, D., Crespo-Sánchez, P. y Mosquera-Rojas, G. (2018). Umbrales en la respuesta de humedad del suelo a condiciones meteorológicas en una ladera Altoandina. *MASKANA*, 9(2), 53–65. <https://doi.org/10.18537/mskn.09.02.07>
- Thunes, K., Midtgaard, F., Kirkendall, L. y Espino, V. (2005). *Los Gorgojos de Pino de Honduras: Descripciones de Especies, Asociaciones de Hospederos y Métodos de Monitoreo y Control*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4661.9281>

- USDA. (2009). "Hydrologic Soil Groups" in *National Engineering Handbook: Part 630*. <https://directives.sc.egov.usda.gov/OpenNonWebContent.aspx?content=22526.wba>
- Villota Rosero, M. A. (2019). *Metodología para el cálculo de los parámetros morfométricos de una cuenca hidrográfica por medio de Sistemas de Información Geográfica. Caso de estudio – Río Mulaló (Yumbo - Colombia)* [Tesis de Grado]. Universidad Nacional de Luján, Argentina. <https://ri.unlu.edu.ar/xmlui/bitstream/handle/rediunlu/755/Villota%20Teledetecci%C3%B3n.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Wei, Z., Lin, C., Xu, C., Xiong, D., Liu, X [Xiaofei], Chen, S., Lin, T., Yang, Z. y Yang, Y. (2022). Soil Respiration in Planted and Naturally Regenerated *Castanopsis carelesii* Forests during Three Years Post-Establishment. *Forests*, 13(6), 931. <https://doi.org/10.3390/f13060931>
- Wilson, H. F., Satchithanatham, S., Moulin, A. P. y Glenn, A. J. (2016). Soil phosphorus spatial variability due to landform, tillage, and input management: A case study of small watersheds in southwestern Manitoba. *Geoderma*, 280, 14–21. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.06.009>
- Yang, X., Ren, L., Singh, V. P., Liu, X [Xiaofan], Yuan, F., Jiang, S. y Yong, B. (2012). Impacts of land use and land cover changes on evapotranspiration and runoff at Shalamulun River watershed, China. *Hydrology Research*, 43(1-2), 23–37. <https://doi.org/10.2166/nh.2011.120>

Anexos**Anexo A**

Sensor de Temperatura y Humedad del Suelo: HOB0 EC5 Soil Moisture.



Anexo B

Pluviómetro métrico: RainGauge 0.2 mm with pendant RG3-M.



Anexo C

Grabador de Datos y Software HOBO Waterproof Shuttle.



Anexo D

Sensor de presión atmosférica sobre el caudal: HOBO Water Level (13 ft) Data Logger - U20L-04



Anexo E

Caracterización de vegetación por parcelas anidadas en parte baja de la microcuenca quebrada del

Plan



Anexo F

Cobertura presente en la parte baja de la quebrada del Plan



Anexo G

Caracterización de cobertura vegetal menor en parcelas de 1 × 1 m en la parte alta de la quebrada del Plan



Anexo H

Cobertura presente en la parte alta de la quebrada del Plan



Anexo I

Pinos bajo plantación en la quebrada del Plan



Anexo J*Medición de caudal en la quebrada del Plan*

Anexo K*Sensor de caudal en la quebrada del Plan*

Anexo L

Estación grabadora de datos y precipitación en la quebrada del Plan



Anexo M

Caracterización de vegetación por parcelas anidades en parte baja de la microcuenca quebrada

Cupiles de Quiles



Anexo N

Medición de brinzales en la parte baja de la quebrada Cupiles de Quiles



Anexo O

Cobertura presente en la parte baja de la quebrada Cupiles de Quiles



Anexo P

Caracterización de vegetación por parcelas anidadas en parte alta de la microcuenca quebrada

Cupiles de Quiles



Anexo Q

Cobertura presente en la parte alta de la quebrada Cupiles de Quiles



Anexo R

Caracterización de vegetación por parcelas anidadas en parte baja de la microcuenca quebrada El

Coyolito



Anexo S

Cobertura presente en la parte baja de la quebrada El Coyolito



Anexo T

Caracterización de cobertura vegetal menor en parcelas de 1×1 m en la parte alta de la quebrada El

Coyolito



Anexo U

Sensor de humedad de suelo en la parte alta de la quebrada El Coyolito



Anexo V

Cobertura presente en el área del sensor de humedad de suelo y afectada por incendios en la parte alta de la quebrada El Coyolito



Anexo W

Cobertura presente en el área bajo plantación afectada por el gorgojo y los incendios en la parte alta de la quebrada El Coyalito



Anexo X

Pinos bajo plantación afectados por incendios en la quebrada El Coyolito



Anexo Y

Sensor de caudal instalado en la quebrada El Coyolito



Anexo Z*Estación grabadora de datos y precipitación en la quebrada El Coyolito*

Anexo AA

Caracterización de vegetación por parcelas anidadas en parte baja de la microcuenca quebrada Las

Guamas



Anexo BB

Caracterización de cobertura vegetal menor en parcelas de 1×1 m en la parte baja de la quebrada

Las Guamas



Anexo CC

Cobertura presente en la parte baja de la quebrada Las Guamas



Anexo DD

Caracterización de vegetación por parcelas anidadas en parte alta de la microcuenca quebrada Las

Guamas



Anexo EE

Caracterización de cobertura vegetal menor en parcelas de 1×1 m en la parte alta de la quebrada Las

Guamas



Anexo FF

Medición de pinos bajo regeneración natural en la parte alta de la quebrada Las Guamas



Anexo GG

Cobertura presente en la parte baja de la Q. Las Guamas



Anexo HH

Estación grabadora de datos y precipitación en la quebrada Las Guamas

