

**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 de suelo en  
microcuencas afectadas por Gorgojo Descortezador de Pino  
(*Dendroctonus frontalis*) en la Región Central de Honduras**

Estudiante

Aarón Ernesto Mejía Bendeck

Asesores

Josué León, Mtr.

Alexandra Manueles, Mtr.

Samuel Rivera, Ph.D.

Honduras, agosto 2022

**Autoridades**

**TANYA MÜLLER GARCÍA**

Rectora

**ANA MARGARITA MAIER**

Vicepresidenta y Decana Académica

**ERIKA TENORIO MONCADA, M.Sc**

Director(a) nombre Departamento Académico

**HUGO ZAVALA MEMBREÑO**

Secretario General

## Contenido

Índice de Cuadros .....	5
Índice de Figuras .....	6
Índice de Anexos .....	7
Resumen .....	8
Abstract .....	9
Introducción.....	10
Metodología .....	16
Área de Estudio.....	16
Análisis de Cuencas Pareadas .....	17
Selección de Microcuencas .....	18
Instrumentos Hidrometeorológicos de Medición .....	20
Microcuenca Tratamiento .....	20
Microcuenca control .....	22
Caracterización de Usos y Coberturas in-situ.....	23
Recolección y Registro de Datos .....	24
Análisis de Datos .....	25
Resultados y Discusión.....	26
Parámetros Morfométricos .....	26
Geología y Tipo de Suelo.....	32
Usos y coberturas respecto a la humedad del suelo.....	36
Retención de Humedad de Suelo.....	37
Comparación de Humedad del Suelo (HS) en Microcuencas .....	39

	4
Conclusiones.....	41
Recomendaciones.....	42
Referencias .....	43
Anexos .....	48

### Índice de Cuadros

Cuadro 1 Variables para la clasificación de los pares de microcuencas. ....	19
Cuadro 2 Parámetros morfométricos de las microcuencas Q. del Plan y Q. Cupiles de Quiles .....	26
Cuadro 3 Rango de pendientes de las microcuencas de estudio .....	29
Cuadro 4 Comparación de usos y coberturas de las microcuencas.....	31
Cuadro 5 Área plagada y restaurada de cada microcuena .....	34
Cuadro 6 Comparación de usos y coberturas mediante muestras in situ .....	36
Cuadro 7 Comparación de la parte alta del área afectada de las microcuencas quebrada del Plan y quebrada Cupiles de Quiles. ....	39
Cuadro 8 Comparación de la parte baja del área afectada de las microcuencas quebrada del Plan y quebrada Cupiles de Quiles. ....	40

### Índice de Figuras

Figura 1 Ubicación de las microcuencas de estudio en el mapa departamental de Honduras .....	17
Figura 2 Mapa de la microcuenca tratamiento quebrada del Plan .....	21
Figura 3 Mapa de la microcuenca testigo Quebrada Cupiles de Quiles. ....	22
Figura 4 Mapa de pendientes de la microcuenca quebrada del Plan.....	27
Figura 5 Mapa de pendientes de la microcuenca quebrada Cupiles de Quiles .....	28
Figura 6 Mapa de usos y coberturas de la microcuenca quebrada del Plan .....	30
Figura 7 Mapa de usos y coberturas de la microcuenca quebrada Cupiles de Quiles .....	30
Figura 8 Mapa de clasificación de tipo de suelo de la microcuenca quebrada Cupiles de Quiles .....	32
Figura 9 Zonificación y área de tratamiento de plantación forestal en la microcuenca quebrada del Plan .....	34
Figura 10 Zonificación y tratamiento de regeneración natural en la microcuenca quebrada Cupiles de Quiles.....	35
Figura 11 Evolución de la humedad de suelo de la microcuenca quebrada del Plan. ....	37
Figura 12 Evolución de la humedad de suelo de la microcuenca quebrada Cupiles de Quiles. ....	38

## Índice de Anexos

Anexo A Sensor de Temperatura y Humedad del Suelo: HOBO EC5 Soil Moisture ubicado en la parte alta del área afectada de la microcuenca quebrada Cupiles de Quiles. ....	48
Anexo B Pluviómetro métrico: RainGauge 0.2 mm with pendant RG3-M ubicado en la parte baja del área afectada de la microcuenca quebrada Cupiles de Quiles.....	49
Anexo C Grabador de Datos y Software HOBO Waterproof Shuttle ubicado en la parte baja del área afectada de la microcuenca quebrada Cupiles de Quiles.....	50
Anexo D Método de parcelas anidadas para caracterización in situ para las microcuencas.....	51
Anexo E Visita a campo de la microcuenca quebrada del Plan .....	52
Anexo F Visita a campo de la microcuenca quebrada Cupiles de Quiles.....	53
Anexo G Recolección de datos de humedad de suelo en las microcuencas .....	54

## Resumen

Los bosques de pino en Honduras se han visto afectados por varios factores, entre ellos la plaga de gorgojo descortezador de pino (*Dendroctonus frontalis*) que impacta fuertemente en el recurso hídrico de las microcuencas. Desde el 2016, el gorgojo afectó el área de numerosas cuencas de la República de Honduras, principalmente en la zona central del país, las áreas más afectadas requieren prácticas para la regeneración de bosques. Por ello, se evaluó dos microcuencas afectadas por la plaga y posteriormente caracterizadas, estas fueron quebrada del Plan y quebrada Cupiles de Quiles, las cuales cuentan con reforestación por plantación inducida y por regeneración natural respectivamente. Las microcuencas fueron comparadas mediante el método de cuencas pareadas. Los datos de humedad del suelo fueron recolectados de forma horaria desde el 10 de febrero hasta el 16 de mayo del 2022, mayormente en la época seca. Durante el primer período de evaluación se comparó la variable de humedad del suelo para medir el impacto que genera el método de restauración de cada microcuenca y conocer cual resulta más efectivo para retención de humedad. El método de plantación inducida reportó menor retención de humedad en el suelo en la parte alta del área afectada de la microcuenca en comparación con el método de regeneración natural mientras que en la parte baja de ambas unidades no se reportó una diferencia significativa. Se espera que los resultados de este estudio sean un insumo de base para las decisiones de manejo de las microcuencas y orientar futuras investigaciones.

*Palabras clave:* cuencas pareadas, plantación inducida, regeneración natural, reforestación.

### Abstract

Pine forests in Honduras have been affected by several factors, including the pine bark beetle pest (*Dendroctonus frontalis*), which has a strong impact on the water resources of the micro-watersheds. Since 2016, the weevil affected the area of numerous watersheds in the Republic of Honduras, mainly in the central zone of the country, the most affected areas require practices for forest regeneration. Therefore, two micro-watersheds affected by the pest were evaluated and subsequently characterized, these were del Plan stream and Cupiles de Quiles stream, which have reforestation by induced planting and reforestation by natural regeneration respectively. The micro-watersheds were compared using the paired watershed method. Data were collected on an hourly basis from February 10 to May 16, 2022, mostly during the dry season. During the first year of implementation, the soil moisture variable was compared to measure the impact generated by the reforestation method of each micro-watershed and to know which is more effective. The induced planting method reported lower soil moisture retention in the upper part of the watershed compared to the natural regeneration method, while in the lower part of both units no significant difference was reported. It is expected that the results of this study will be a positive input for management decisions in the micro-watersheds and will guide future research by adding new variables such as flow measurement.

*Keywords:* pine bark beetle, induced planting, natural regeneration, paired watersheds.

## Introducción

Honduras es un país centroamericano, que actualmente presenta problemas debido al cambio climático, y, por tanto, las áreas boscosas son amenazadas por una serie de alteraciones ambientales que van desde los incendios forestales, plagas y enfermedades. De acuerdo con la CEPAL (2011), para el año 2050, la región centroamericana aumentará su temperatura promedio anual entre 1.4°C y 2.3°C, asimismo los niveles de precipitación decaerán entre 25% y 46% afectando directamente el régimen ecológico de la República de Honduras. El área forestal de Honduras representa uno de los principales capitales naturales y fuentes de desarrollo de la nación, actualmente el 50% del territorio de la República de Honduras está cubierto de bosques (5.4 millones de hectáreas) del cual un 36.7% (1,94 millones de Ha) corresponden a bosques de pino, localizados principalmente en la parte centro oriental y occidental del país, y un 5% (0,3 Millones) a bosques que combinan pino con otras especies.

Los derechos de uso de bosques en la Republica de Honduras, dependen del régimen de propiedad de la tierra, sea esta pública o privada acorde al artículo 45 de la Ley Forestal, además de las formas de usos que el Estado ha definido (producción o protección) según el artículo 63, aprobados por el Instituto de Conservación Forestal (ICF), rector del sector, mediante distintos instrumentos legales. El ICF es una entidad adscrita a la secretaria de Recursos Naturales, Ambiente y Minas (MI AMBIENTE), el cual es responsable de políticas naciones de conservación y desarrollo forestal, además de las áreas protegidas y la vida silvestre (Banco Interamericano de Desarrollo [BID], s. f.).

En el caso de que los bosques privados que se destinan a la producción forestal, es indispensable que cuenten con planes de manejo forestales aprobados por el ICF. Por otra parte, los bosques denominados públicos de producción son asignados únicamente por el ICF, destinado a las comunidades mediante contratos forestales y sus respectivos planes de manejo, ubicados en el marco del sistema social forestal hondureño (art. 77-130). Además, el ICF define los bosques de protección, por medio de declaraciones de áreas protegidas o microcuencas abastecedoras de agua. El territorio hondureño cuenta con el 18% de bosques de pino denominados como bosques de producción privada,

el 19% como bosques de producción públicos, el 14% como áreas protegidas y el 48% sin definición de uso (Billings, 2016).

Recientemente el sector forestal se ha considerado sumamente prioritario en el plan de desarrollo productivo nacional (Banco Interamericano de Desarrollo [BID], s. f.) debido a que estos bosques han estado sometidos a amenazas por diversos agentes destructivos por largos periodos de tiempo como huracanas, sequías, incendios forestales, actividades humanas y distintas plagas forestales (Billings et al., 2004). Sin embargo, debido a los efectos negativos del cambio climático, desde el año 2012 los bosques de pino de hondureños están atravesando una difícil situación por plagas forestales, siendo afectados principalmente por la plaga del Gorgojo Descortezador (*Dendroctonus spp frontalis*) que hasta agosto del 2016 había destruido más de 480 hectáreas de bosque (25% del área total de pino). Datos que equivalen a la deforestación que habría ocurrido en más de 100 años para este tipo de bosques (Banco Interamericano de Desarrollo [BID], s. f.; Billings et al., 2004). Este insecto es considerado la principal plaga de los pinares de toda la región centroamericana

Los bosques de pino en el territorio hondureños actualmente son afectados por la plaga Gorgojo Descortezador del Pino, la cual se manifiesta como una de las principales causas de pérdidas de bosques en el país. Existen varios factores que nos ayudan a explicar el desarrollo de brotes epidémicos. En variadas ocasiones se ha relacionado los factores climáticos con el estrés de los árboles de pino y el cambio en la intensidad de los brotes; sin embargo, estas investigaciones quedaron sin conclusiones claras en cuanto a la relación de los mencionados factores (Billings et al., 2004). Por otro lado, distintos autores ligan la ocurrencia de brotes con factores como disturbios climáticos, dinámica poblacional de la plaga y la alta densidad de árboles en bosques no manejados correctamente (Spittlehouse, 2005)

Se conoce que la plaga más devastadora registrada, en Honduras, se produjo entre los años 1962-1965, la cual ocasionó pérdidas estimadas de 1.7 millones de hectáreas. Sin embargo, desde el

año 2012 se ha producido una nueva epidemia con una gran afectación en los bosques de pino, se considera la más destructiva después del brote en la década de 1960. Según un informe del ICF (2016), son más de 488,000 hectáreas de bosque de pino que han sido afectadas por la plaga. Estas hectáreas se concentran en los departamentos de Olancho (44% de afectación), Francisco Morazán (23%), Yoro (14%) y Comayagua (10%).

La plaga del gorgojo descortezado de pino pone en estado precario el área de una elevada cantidad de microcuencas del país, amenazando el estado de los sistemas hídricos de estas, así como las condiciones básicas de vida digna de los habitantes cercanos a las cuencas. También afectando los bienes y servicios que producen las microcuencas y los bosques, impactando fuertemente el desarrollo sostenible del país en cuanto al recurso hídrico que ofrecen las microcuencas (Comisionado Nacional de los Derechos Humanos [CONADEH] y Defensoría Nacional del Medio Ambiente, 2016). Se estima que la plaga afecta a más de 900,000 hectáreas de bosque hondureño y esto es debido al cambio en el clima que genera un ambiente idóneo para la expansión de esta (Comisionado Nacional de los Derechos Humanos [CONADEH] y Defensoría Nacional del Medio Ambiente, 2016).

El Gobierno de Honduras está realizando acciones para contrarrestar las zonas afectadas por la plaga, según datos de ICF (2016) se han asignado USD \$10 millones en el año 2015 y USD \$16 millones en el año 2016. El saneamiento y actividades de control se realizan con brigadas especializadas contratadas por el Estado (CONADEH, 2016). Desde el año 2016, se han realizado actividades de control en más de 189,124 hectáreas por parte del gobierno, además de estimar que, debido a las acciones mencionadas, se ha evitado la afectación de 1.8 millones de Ha de bosque de pino y bosques mixtos (Billings, 2016).

Navarro (2018) en su investigación “Desarrollo de un modelo para la identificación de áreas con riesgo de ataque del gorgojo descortezador de pino (*Dendroctonus adjunctus*) en los departamentos de Quetzaltenango y Totonicapán, Guatemala” plantea que la plaga del Gorgojo de Pino afecta a todos los bosques de coníferas y se ha intensificado últimamente debido a la acción

negativa del cambio climático. Explica que existen más de 3.8 millones de hectáreas de bosque de pino en Centroamérica y un alto porcentaje de estos están siendo debilitados por la plaga del Gorgojo de Pino y esto debido a proporción de un ambiente idóneo para el brote de la plaga forestal.

(Jobbágy et al., 2013) con su estudio “Rendimiento hídrico en cuencas primarias bajo pastizales y plantaciones de pino de las sierras de Córdoba (Argentina)” analiza diferentes estudios hidrológicos comparativos de pequeñas cuencas pareadas de pastizales forestados con especies de rápido crecimiento (pinos y eucaliptos) y controles no forestados. Del mismo modo, concluye que existen situaciones en las que la forestación, en este caso el Pino, tienen efectos positivos sobre las provisiones de agua dentro de cuencas y microcuencas, es específico en cuencas que fueron forestadas posteriores a sufrir degradación por plagas, sobrepastoreo y/o laboreo del suelo.

Farley et al. (2008) mostró respuestas del caudal de cuencas montañosas, luego de cambios en la vegetación y uso de los suelos, una alteración en el caudal total anual y su estacionalidad. Se documentaron crecientes inmediatamente posteriores a las lluvias y se asoció el caudal base al aporte más lento del sistema hidrológico subterráneo. Tras una revisión global con estudios hidrológicos comparativos de microcuencas pareadas, principalmente de pastizales forestados con especies de crecimiento rápido (ej. pino y eucalipto), y controles no forestados, indicó una reducción general en el rendimiento hídrico posterior a la forestación (Farley et al., 2008).

El aumento de la población y las presiones socioambientales día a día generan enormes preocupaciones para la satisfacción de demandas tales como la alimentación o bien actividades y recursos naturales como por ejemplo suelo, agua, bosque y biodiversidad. Sin embargo, en las últimas décadas se han observado graves situaciones en cuanto a los procesos de degradación de los recursos ambientales mencionados con anterioridad, así como consecuencias graves para el desarrollo y sostenibilidad ambiental, así como serios conflictos socioecológicos (Belalcázar Benavides y Ortega Bolaños, 2018).

Entre los recursos ambientales con mayor degradación se encuentra el agua y el suelo, principales componentes de las cuencas hidrográficas que, por su parte, alberga muchos recursos naturales tales como suelo, agua, vegetación entre otros, dentro de este territorio el humano habita y en ella se realizan muchas actividades vitales (Faustino y Jiménez, 2000).

Por tanto, es necesario hacer uso de técnica y metodologías que permitan identificar y evaluar si las prácticas de reforestación que se aplicaron son realmente eficientes para la recuperación del ciclo hidrológico afectado por la plaga del Gorgojo Descortezado de Pino en las microcuencas estudiadas, analizando principalmente la recarga hídrica mediante la retención de agua en el suelo. Para ello se utilizará el método de cuencas pareadas, la cual ayudará a controlar los aspectos hidrogeológicos de las cuencas. Este concepto utiliza dos cuencas hidrográficas vecinas, una empleada como control y la otra como tratamiento (Ssegane et al., 2013).

El método de cuencas pareadas sugiere que las microcuencas a estudiar se encuentren cercanas o compartan aspectos hidrogeológicos, sin embargo, existe una dificultad de encontrar microcuencas cercanas para la realización de este estudio. Debido a ello, se escogieron dos microcuencas con contextos biofísicos semejantes (suelo, clima, temperatura, cobertura etc.). Los resultados servirán para proporcionar datos concisos sobre la eficiencia de los sistemas de recuperación de las microcuencas afectadas por la plaga. Del mismo modo, la investigación contribuye a analizar la capacidad de infiltración de los suelos de las microcuencas elegidas, mediante la variable de humedad del suelo, el comportamiento de la capa freática en cuanto a infiltración y percolación, el almacenamiento en los acuíferos y las posibles fugas hídricas.

La presente investigación se basa en evaluar el impacto de la restauración inducida para las microcuencas afectadas por la plaga o dejar la recuperación natural de las áreas afectadas. Es por ello, que es necesario profundizar en dos microcuencas biofísicamente similares, una ubicada en la jurisdicción de Siguatepeque, en Bosque Escolar de UNACIFOR, en el Departamento de Comayagua (tratamiento) y otra ubicada en las comunidades de Las Moras y San Francisco de Soroguara, en el

departamento de Francisco Morazán (control), las cuales responden a los nombres de quebrada del Plan y Cupiles de Quiles respectivamente.

La investigación contribuyó a un proyecto de Secretaría de Estado en el Despacho de Finanzas (SEFIN) y el Banco Interamericano de Desarrollo (BID), con título de “Programa de Restauración de Bosques Resilientes al Clima y Silvicultura para la Sostenibilidad de los Servicios Ecosistémicos Relacionados con el Agua (HO-L1200/HO-G1252)” el objetivo general del proyecto es la mejora de la resiliencia climática de los bosques localizado en zonas críticas para la provisión de agua. Logrando lo antes mencionado mediante la restauración forestal y el fortalecimiento de la gobernanza y sostenibilidad financiera.

Este estudio responde a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) planteados por el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), específicamente con el de acción por el clima y vida de ecosistemas terrestres. El objetivo se fundamenta en evaluar el efecto de la restauración forestal en la conservación del agua en el suelo en dos microcuencas afectadas por la plaga *Dendroctonus frontalis*. Para ello, se establecieron dos objetivos específicos, los cuales fueron: Caracterizar biofísicamente las microcuencas quebrada del Plan (en restauración mediante establecimiento de plantación) y quebrada Cupiles de Quiles (bajo regeneración natural), también, evaluar el efecto de retención de humedad en el suelo de la restauración mediante plantación forestal (quebrada del Plan) y regeneración natural (quebrada Cupiles de Quiles).

### **Metodología**

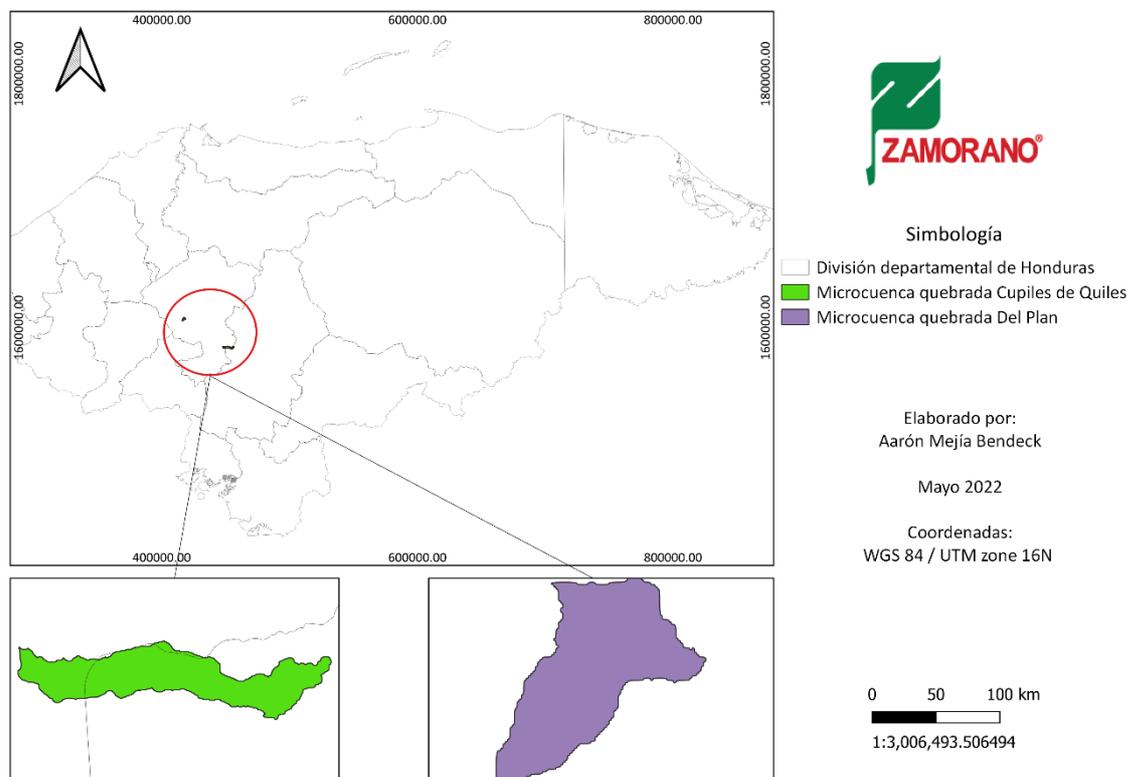
El presente estudio se desarrolla en el marco de los proyectos BID 3878/BL-HO y HO-L1200/HO-G1252, los cuales se encuentran en su etapa de implementación. Estos proyectos buscan la restauración de bosques afectados por gorgojo descortezador, implementar manejo forestal adaptativos y reforzar las capacidades técnico-científicas del gobierno hondureño para enfrentar los embates que afectan el bosque de coníferas. El propósito es medir un posible efecto en la mejora de la disponibilidad de agua causada por el aumento de la cobertura vegetal. Por ende, para este estudio se midió la variable de humedad del suelo en dos microcuencas establecidas.

### **Área de Estudio**

El área de estudio se compone de dos microcuencas ubicadas en la región central de Honduras, específicamente en los departamentos de Comayagua y Francisco Morazán (Figura 1). La microcuenca quebrada del Plan se encuentra en el municipio de Siguatepeque, el Bosque Escolar de UNACIFOR, departamento de Comayagua la cual se encuentra bajo restauración a través de reforestación por plantación con especie de *Pinus oocarpa*. Mientras que 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**

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



*Nota.* Los polígonos fueron generados por el técnico de monitoreo del indicador hídrico del proyecto Manejo Sostenible de Bosques, Oscar Fuentes (Comunicado personal).

### **Análisis de Cuencas Pareadas**

El análisis de cuencas pareadas propuesto se basa en la evaluación simultánea de dos microcuencas, una con tratamiento de reforestación inducida y otra mediante regeneración natural, con estaciones de monitoreo con sensores de humedad en la parte alta y baja del área afectada de las microcuencas. (Loftis et al., 2001) demuestran las ventajas de la utilización del análisis de cuencas pareadas en comparación con estudios de una sola cuenca, afirman que el efecto mínimo detectable define un cambio en la respuesta hidrológica que es estadísticamente significativo. (Clausen y Spooner, 1993) justifican las ventajas de los estudios de cuencas pareadas para incluir un control estadístico de diferencias climáticas e hidrogeológicas, además de enfatizar en la necesidad de medir variables que causan el cambio hidrológico.

La idea se fundamenta en estudiar el efecto en el caudal de salida en un plazo de tiempo mayor, tomando como variable primaria la humedad de suelo en el primer año de tratamiento. Cualquier diferencia entre las dos, es atribuida al tratamiento aplicado.

### **Selección de Microcuencas**

Para la selección de las microcuencas se utilizó la metodología de cuencas pareadas explicada anteriormente, se utilizó modelos de Random Forest (RF) en el análisis de datos que incluyen: predicción (o pronóstico), preprocesamiento, selección de variables, división del conjunto de datos en períodos de entrenamiento y prueba, y evaluaciones de desempeño predictivo. Para determinar las unidades de análisis, inicialmente se estableció el universo de microcuencas propuestas a ser analizadas, estas unidades fueron clasificadas en grupos o clústeres. Para ello, se utilizó algoritmos de clasificación, con el propósito que todo el universo en el área del proyecto sea clasificado en clústeres con características similares, comparables entre sí y se observe el efecto de la variable en medición, en este caso, la humedad de suelo.

El universo mencionado comprende 38 microcuencas con tratamiento y 38 microcuencas sin tratamiento. Sin embargo, después de discutir y depurar el universo, se revisaron los parámetros morfométricos y biofísicos y se aseguraron de que cuatro pares de cuencas tengan requerimientos mínimos de comparabilidad. De tal forma, que para este estudio se está trabajando un par de cuencas seleccionadas donde se instaló equipo de monitoreo y su localización es más accesible para visitas en campo.

Para la selección de cuencas pareadas se revisaron los parámetros morfométricos y biofísicos, de modo que posean los requerimientos mínimos de comparabilidad. Asimismo, se evaluó la importancia de las variables predictoras investigando información sobre el rendimiento de los predictores individuales en el modelado de las variables de respuesta (Rivera, 2021). La geología fue una de las variables principales para la estructuración de las microcuencas en clústeres, de modo que, las unidades elegidas no se encuentran localizadas físicamente cerca o en pares, tal como lo establece

la teoría de las cuencas pareadas (Ssegane et al., 2013). No obstante, existen otras variables utilizadas para la clasificación de las unidades en clústeres, las cuales se muestran en el Cuadro 1.

### **Cuadro 1**

*Variables para la clasificación de los pares de microcuencas.*

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

El análisis Random Forest asigna el nivel de importancia de las variables en mención, a las microcuencas seleccionadas bajo un universo de la red hidrológica de la zona central de Honduras. De tal forma, se agrupan las microcuencas, en clústeres, cuyas características sean mayormente similares respecto a las variables indicadas anteriormente. Posteriormente, bajo criterio de expertos se discutió y depuró el listado para que coincidan los parámetros morfométricos y biofísicos para obtener requerimientos de comparabilidad, obteniendo el par de microcuencas en estudio. Asimismo, es importante mencionar que para la selección de los pares de microcuencas se consideró que estas no se encuentran localizadas físicamente cerca, tal como lo plantea la metodología de cuencas pareadas, dándole importancia primaria a la variable geológica para la preselección de las unidades.

Antes de la selección de las microcuencas los expertos y técnicos depuraron el listado de parámetros de manera que las unidades posean requerimientos mínimos de comparabilidad. Después, se realizaron comprobaciones en campo y se tomó muestras de microcuencas con y sin tratamiento para la selección. También con las visitas a campo de las unidades seleccionadas se observó la viabilidad de cada una para la instalación de los instrumentos de medición, es decir, la

seguridad de la estación de medición y que en la microcuenca no existieran derrumbes de gran magnitud que puedan afectar los datos.

### **Instrumentos Hidrometeorológicos de Medición**

Para la selección de equipos se prepararon especificaciones y requerimientos de los sensores y equipo a utilizar. Para la realización de esta fase preliminar del estudio, se colocaron Sensores de Temperatura y Humedad del Suelo: HOBO EC5 Soil Moisture (dos por microcuenca) (Anexo A), Pluviómetro HOBO: RainGauge 0.2 mm with pendant RG3-M (uno por microcuenca) (Anexo B) y Grabador de Datos y Software HOBO Waterproof Shuttle (uno por microcuenca) (Anexo C).

Para la instalación de los instrumentos se categorizó la viabilidad y seguridad para un óptimo desempeño, esto se realizó tomando en cuenta el centroide de afectación de la plaga (Campbell et al., 2016). Posterior a la instalación de los instrumentos de medición existió un periodo de prueba y calibración que duró una semana para después iniciar con la toma de datos, la programación del equipo fue en formato horario, es decir un dato por hora o 24 datos al día. Los datos se tomaron constantemente y se descargaron mensualmente en forma tabulada y gráfica por medio del software HOBOWere para la lectura de los instrumentos, posteriormente exportados como ficheros en “Excel Versión 2016”.

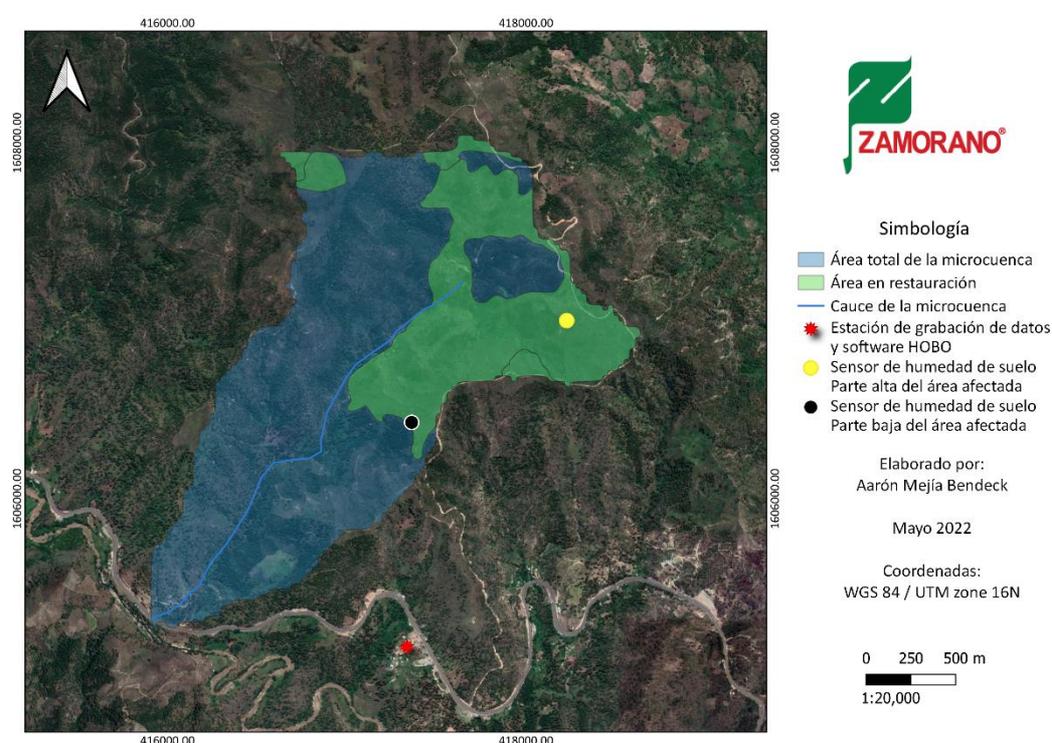
### **Microcuenca Tratamiento**

Para la elección de la microcuenca tratamiento (reforestación inducida) se tomó en cuenta únicamente las microcuencas con el programa de reforestación del ICF, posteriormente, se buscó el par correspondiente en los clústeres anteriormente discutidos con el objetivo de encontrar la mejor opción como control. La información se filtró partiendo de la geología y del total de área sin intervención de las posibles microcuencas, de esta manera con herramientas de Sistemas Información Geográficas (SIG) se seleccionó las unidades que cumplían las variables. Se completó esta fase con visitas en campo y a partir de ello se optó por la unidad que más cercana del tratamiento.

Dentro del total de microcuencas seleccionadas como tratamiento, para este estudio se analizó la quebrada del Plan (Figura 2), en Bosque Escolar de UNACIFOR, esta unidad se encuentra bajo restauración a través de un plan de reforestación con pino, luego de la afectación por la plaga del Gorgojo Descortezador de Pino (*Dendroctonus* sp). Esta microcuenca tiene un área total de 353.01 hectáreas, de las cuales 109.74 Ha (41.2%) se encuentran en restauración con plantación inducida.

**Figura 2**

*Mapa de la microcuenca tratamiento quebrada del Plan*



*Nota.* Los polígonos fueron generados por el técnico de monitoreo del indicador hídrico del proyecto Manejo Sostenible de Bosques, Oscar Fuentes (Comunicado personal).

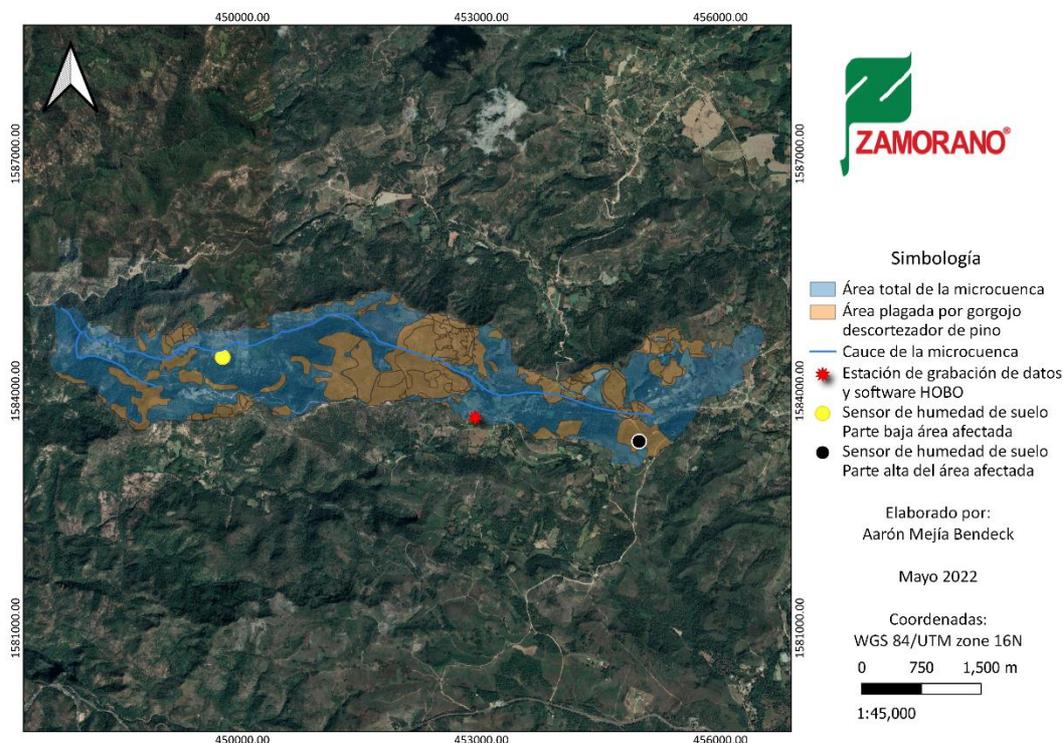
Para la elección las microcuencas de estudio se analizó un clúster con el fin de encontrar aquellas que cumplieran con los parámetros establecidos, tales como similitud en tamaño y en aspectos biofísicos (temperatura, humedad, geología, etc.). Del mismo modo, se usó de herramientas de Sistemas de Información Geográficas (SIG). Se utilizó el programa QGis con el fin de conocer la geografía del lugar de estudio y detallar la información necesaria para la recolección de los datos de humedad de suelo.

### Microcuenca control

Para la selección de la microcuenca control se utilizó el procedimiento de conglomerados, tomando como referencia sustancial las microcuencas previamente denominadas como tratamiento. Los conglomerados permitieron analizar la estructura en una base de datos, de las posibles microcuencas control, para estimar la similitud que tienen con las unidades tratamiento. Terminado el método de conglomerados; el Departamento de Cuencas Hidrográficas y el CIPF del ICF realizó trabajos en campo con el fin de establecer la microcuenca control. De esta manera se obviarán todas las unidades con presencia de proyectos de conservación forestal, y así garantizando la ausencia de intervención (Hernández, s.f.). Después de esta fase, se seleccionó la microcuenca quebrada Cupiles de Quiles, la cual se ubica en las comunidades de Las Moras y San Francisco de Soroguara, municipio del Distrito Central en el departamento de Francisco Morazán (Figura 3).

### Figura 3

*Mapa de la microcuenca testigo Quebrada Cupiles de Quiles.*



*Nota.* Los polígonos fueron generados por el técnico de monitoreo del indicador hídrico del proyecto Manejo Sostenible de Bosques, Oscar Fuentes, (Comunicado personal).

Para finalizar la selección de unidades de estudio, se tomaron criterios de selección de microcuencas candidatas para monitoreo y control, haciendo uso de SIG con los programas QGis y ArcGis, que son sistemas de información geográfica, se determinó y comparó las variables biofísicas de las microcuencas, también con evaluaciones en campo se juzgó la factibilidad de la toma de datos. Se tomaron en cuenta varios criterios para la caracterización de las microcuencas, se observaron y compararon los parámetros morfométricos de cada una de las unidades. Haciendo uso de SIG se calculó el área, perímetro y largo de cada microcuenca. Asimismo, con un Modelo Digital de Elevación (DEM) obtenido de la página Earth Data de la Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (NASA), se calculó las altitudes y pendientes por medio de la elaboración de mapas en conjunto con tablas. Posteriormente se calculó el ancho (Ecuación [1]) y el coeficiente de Gravelius (Ecuación [2]), este último para conocer la forma de las microcuencas, para ello se utilizaron las siguientes formulas:

$$Ancho = \frac{\text{Área (km}^2\text{)}}{\text{Largo (km)}} [1]$$

$$C_f = 0.282 \frac{P}{\sqrt{A}} [2]$$

$C_f$  = Coeficiente de Gravelius

P = Perímetro de la microcuenca (km)

A = Área total de la microcuenca (km<sup>2</sup>)

Con los parámetros morfométricos conocidos se elaboraron mapas para visualizar mejor los parámetros e inició la comparación entre ellas. Para comparar el efecto en la humedad local del suelo tanto en la restauración por plantación inducida como regeneración natural, se utilizará la variable respuesta de humedad de suelo, la cual será medida de forma horaria mediante sensores de humedad de suelo "HOBO".

### **Caracterización de Usos y Coberturas in-situ**

Se realizó una visita a campo identificando las principales coberturas de las microcuencas, para ello se utilizó el diseño de parcelas anidadas. Este diseño se utiliza ampliamente en los sistemas

de inventario forestal, de modo que, al separar los resultados obtenidos en subparcelas, una parcela puede capturar una gran variedad de especies, representando con ello una medida de la biodiversidad (Anexo D). Se realizaron tres parcelas cuadradas de 5 m x 5 m (25 m<sup>2</sup>) donde se realizó un conteo en general de las plantas de pino (brinzales) por regeneración natural en la microcuenca quebrada Cupiles de Quiles, y pinos establecidos en plantación en la microcuenca quebrada del Plan, además de un conteo de los latizales de otras especies encontrados.

Dentro de las parcelas delimitadas se encontraron únicamente brinzales y latizales como vegetación secundaria. La vegetación se clasifica como brinzales cuando presentan  $\geq 30$  cm de altura y menor a  $< 5$  cm de diámetro altura pecho (DAP). Por otro lado, la vegetación se clasifica como latizales cuando presenta un DAP  $\geq 5$  a  $< 10$  cm (Vásquez-Cortez et al., 2018). En la regeneración natural se encontró 1,867 latizales de pino por hectárea, mientras que en la reforestación inducida con plantación se encontró 2,120 plantas de pino por hectárea. Posteriormente, dentro de la parcela de 25 m<sup>2</sup> se delimitó una segunda parcela de 2 m x 2 m (4 m<sup>2</sup>), donde se cuantificaron los brinzales de otras especies presentes en cada parcela de cada una de las microcuencas.

Las principales especies de latizales encontradas fueron: Nance de montaña (*Byrsonima* spp.) y árboles de Guayabos (*Psidium* spp.). Los brinzales encontrados son: Nance de montaña (*Byrsonima* spp.), Algodoncillo (*Asclepias* spp.), Guayabos (*Psidium* spp.) y Encinos (*Quercus* spp.). Después, se caracterizó la cobertura baja o menor en la que predominan las gramíneas y algunos pastos, para ello se recolectó 1m<sup>2</sup> de la cobertura mediante un muestreo simple. La muestra física recogida fue picada y secada durante 24 horas en un horno para conocer el valor de la cobertura seca y cuantificar la humedad retenida por esta.

### **Recolección y Registro de Datos**

Los datos de humedad de suelo, precipitación y temperatura fueron recolectados mediante un registro cada hora, desde el 2 de febrero del 2022 hasta el 16 de mayo del 2022. Para estas variables se utilizó instrumentos de medición, como dos pluviómetros métricos HOBO para recolección y

registro de datos de precipitación y tasa de duración de lluvias. Asimismo, se utilizó cuatro sensores de Temperatura y Humedad Relativa del suelo HOBO para monitorear la humedad del suelo en ambas microcuencas en unidades ( $m^3/m^3$  o expresados en porcentaje). También se utilizó una estación con grabador de datos y software HOBO cercanos a los instrumentos. Todo el equipo de medición mencionado se programó para registrar datos en intervalos de una hora.

### **Análisis de Datos**

Para el análisis de los datos se utilizó un modelo estadístico Lineal Generalizado Mixto (GLMM), el cual permite que la media de una población dependa de un predictor lineal a través de una función de enlace de tipo no lineal y que la distribución probabilística de la variable respuesta sea cualquiera de la familia exponencial. De tal forma que las variables explicativas pueden ser cualquier tipo de combinación de variables continuas, variables de clasificación y sus interacciones. En estos modelos estadísticos, la estimación de parámetros se realizan mediante procesos de máxima verosimilitud (Bandera y Pérez, 2018).

Los GLMM ofrecen mayores posibilidades en casos como este estudio, de modo que extienden su panorama al incluir efectos aleatorios y predictores, reduciendo los sesgos, ajustando los datos dispersos y modelando el error en datos provenientes de mediciones longitudinales. Los datos son consecutivos en el tiempo, se recolectaron en formato horario, es decir 24 datos por día, ofreciendo una correlación espacial y comparados por las partes altas y bajas del área afectada de las microcuencas utilizando la precipitación como covariable. Se analizaron mediante el software estadístico *Infostat versión 2018* utilizando un nivel de significancia de 0.05.

## Resultados y Discusión

Las unidades seleccionadas para el estudio fueron la microcuenca quebrada del Plan como tratamiento (Anexo E) y la microcuenca Quebrada Cupiles de Quiles como control (Anexo F). La microcuenca quebrada del Plan se encuentra restaurada con plantación forestal inducida, por otro lado, la quebrada Cupiles de Quiles actualmente no presenta plan de reforestación, sino que está bajo regeneración natural. Ambas microcuencas fueron afectadas por la plaga Gorgojo Descortezador de Pino debido al brote del 2017 (Taiwan International Cooperation and Development Fund [ICDF], 2018).

### Parámetros Morfométricos

El Cuadro 2 presenta los valores de los principales parámetros morfométricos para la microcuenca quebrada del Plan y quebrada Cupiles de Quiles.

#### Cuadro 2

*Parámetros morfométricos de las microcuencas Q. del Plan y Q. Cupiles de Quiles*

Parámetros	Quebrada del Plan	Quebrada Cupiles de Quiles
Área (km <sup>2</sup> )	3.53	9.61
Perímetro (km)	11.90	28.44
Largo (km)	3.32	8.62
Ancho medio (km)	1.06	1.12
Coefficiente de Gravelius	1.79	2.59
Altura máxima (msnm)	1283	1541
Altura mínima (msnm)	876	979
Pendiente media de la cuenca (%)	11.70	18.34
Longitud del cauce principal (km)	2.8	8.3
Densidad de drenaje (km)	0.79	1.02
Tiempo de concentración (min)	20	39

La microcuenca quebrada del Plan tiene un área total de 353.01 ha, asimetría leve, con un perímetro de 11.9 km, el cual es una medición de la línea envolvente de la microcuenca, también presenta una longitud de 3.32 km, con un ancho medio de 1.06 km y una altitud mínima de 876 msnm y máxima de 1283 msnm. Por su parte, la microcuenca quebrada Cupiles de Quiles, presenta una

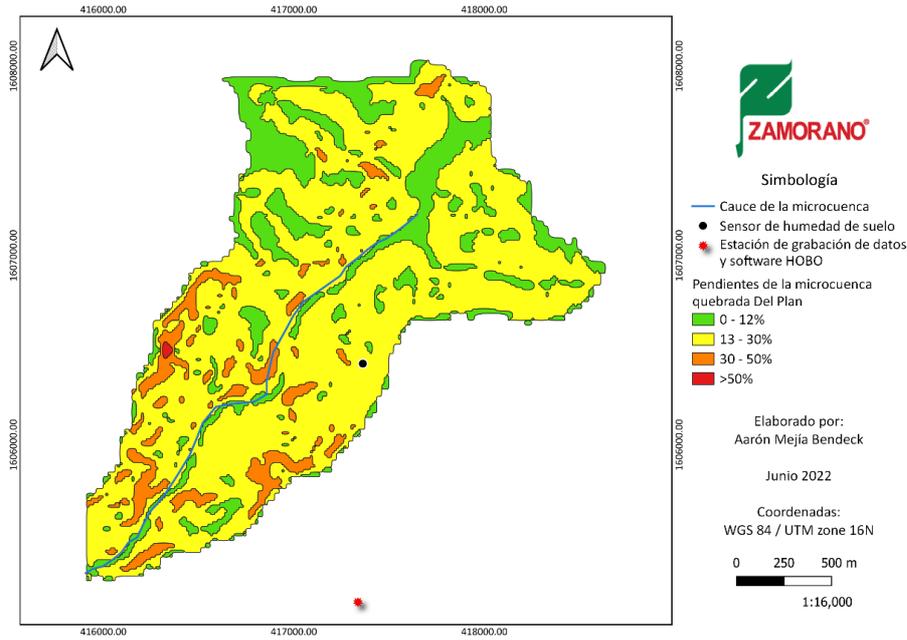
extensión de 961.80 ha y un perímetro de 28.44 km, asimismo, esta microcuenca presenta una longitud de 8.63 km, un ancho medio de 1.12 km, además presenta alturas entre 979 a 1541 msnm. En lo que a altitud se refiere, la microcuenca Cupiles de Quiles presenta mayores rangos, además de tener poca área en la zona baja de la microcuenca, su mayor extensión se localiza en la parte alta, según la metodología de distribución por rangos de altitud topográfica de la cuenca.

Del mismo modo, se calculó el coeficiente de Gravelius para cada microcuenca. Este coeficiente nos indica la forma de la microcuenca, Gravelius relaciona el perímetro de la microcuenca con el perímetro de otra unidad teórica circular de la misma superficie (Aumassane et al., 2018). Se obtuvo un  $C_g = 1.79$  en la microcuenca del Plan, mientras que para la quebrada Cupiles de Quiles  $C_g=2.59$ , clasificando ambas unidades con forma oblonga.

También se estimó la longitud del cauce principal en ambas microcuencas mediante el programa QGis utilizando la red hídrica de Honduras, se obtuvo valores de 2.8 km para la quebrada del Plan, con una densidad de drenaje de 0.79 km y un tiempo de concentración de la cuenca de 20 minutos. Por otro lado, la microcuenca Cupiles de Quiles tiene una longitud del cauce principal de 8.3 km con una densidad de drenaje de 1.02 km y un tiempo de concentración de 39 minutos. A continuación, se muestran los mapas de las pendientes de cada microcuenca (Figuras 4 y 5), se clasificó mediante las especificaciones de Rosales (1998) (Cuadro 3).

#### **Figura 4**

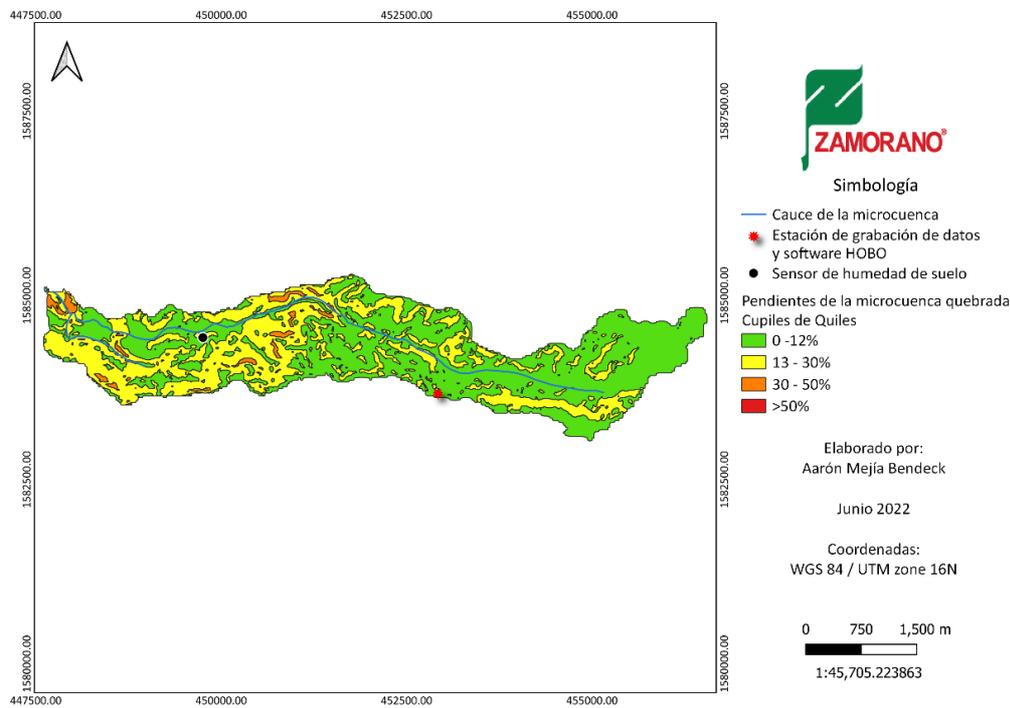
*Mapa de pendientes de la microcuenca quebrada del Plan*



Nota. Tomada de NASA, 2022.

**Figura 5**

*Mapa de pendientes de la microcuenca quebrada Cupiles de Quiles*



Nota. Tomada de NASA, 2022.

**Cuadro 3***Rango de pendientes de las microcuencas de estudio*

Clasificación de pendientes para Honduras (Rosales, 1998)	Microcuenca quebrada del Plan		Microcuenca quebrada Cupiles de Quiles	
	Hectáreas (ha)	Porcentaje (%)	Hectáreas (ha)	Porcentaje (%)
0 – 12%	75.4	21.4	564.8	58.7
13 – 30%	248.8	70.5	375	39
30 – 50%	28.2	8	21.8	2.2
>50%	0.6	0.1	0.2	0.1
Total	353.01	100	961.8	100

En la quebrada del Plan se encontraron pendientes de 13-30% en 248.9 ha, localizadas en la parte alta, media y baja de la microcuenca. Del mismo modo, se encontró pendientes leves de 0-12% de inclinación en 75.4 ha presentes en territorios de la parte alta de la microcuenca. Mientras que en la parte media y baja hay 28.7 ha que superaron el 30% de pendiente. Por su parte, en la quebrada Cupiles de Quiles se encontraron pendientes mínimas entre 0-12% en 574.8 ha de terreno. Además, entre la parte media y alta de la microcuenca se observan leves pendientes que oscilan entre 13-30% con un área de 375.5 ha, no obstante, en la parte media y baja se presenta 21.8 ha que sobrepasan valores mayores a 30% de pendiente.

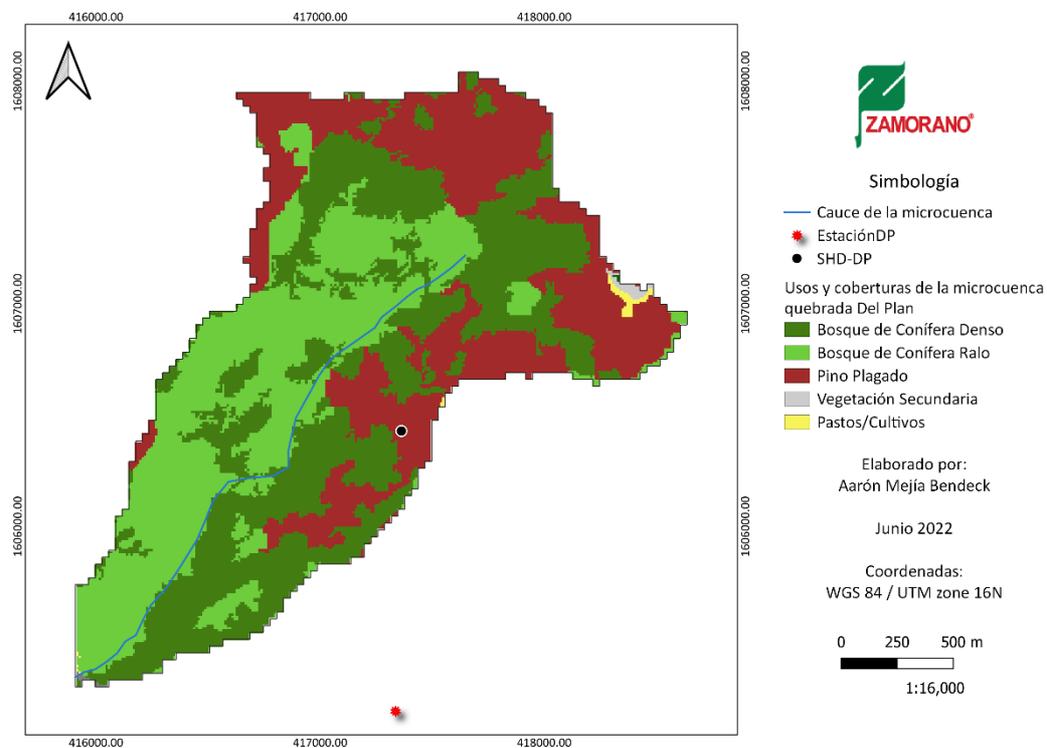
Como establece Martínez et al. (2010) la variable pendiente se considera una variable independiente que afecta considerablemente la humedad de suelo en las microcuencas. El análisis estadístico propuesto por Martínez demuestra que existe una correlación inversa significativa entre la pendiente con la humedad de suelo y otras variables morfométricas, es decir que a mayor pendiente existe menor retención de humedad. Por ende, en el presente estudio resulta importante conocer las pendientes de las microcuencas debido a que es una variable principal que afectan los resultados de la humedad de suelo y su método de restauración.

Del mismo modo, Martínez et al. (2010) establecen que la variable de usos y coberturas afectan el comportamiento hidrológico y la humedad del suelo. Se comprobó una correlación positiva

( $r = 0.46$ ), entre la humedad y número de árboles o vegetación, estableciendo que a mayor cobertura exista, menor será la pérdida de humedad en el suelo. Richard (2016) establece en su estudio que la cobertura del suelo y los eventos antropogénicos son variables que determinan la curva de parámetros hidrológicos, demostrando que, a menor cobertura vegetal y forestal, también es menor la retención de humedad. A continuación, se muestran los mapas correspondientes a los usos y coberturas de las microcuencas (Figuras 6 y 7) de mismo modo se compara cada una de ellas mediante el Cuadro 4.

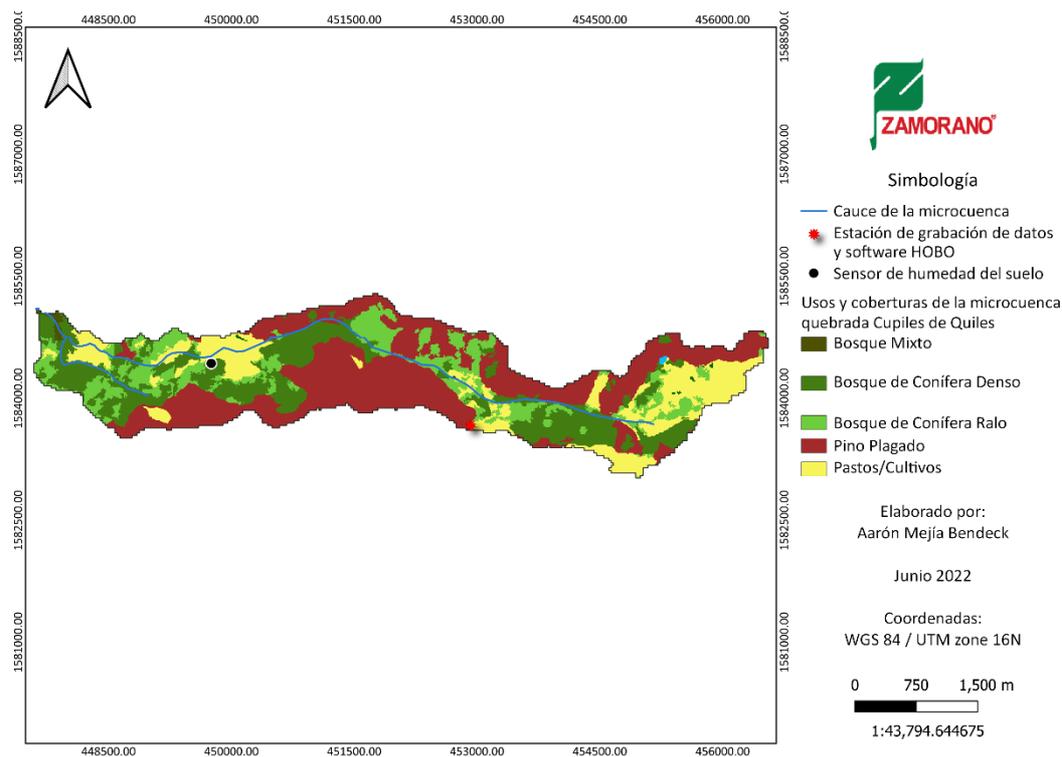
### Figura 6

*Mapa de usos y coberturas de la microcuenca quebrada del Plan*



### Figura 7

*Mapa de usos y coberturas de la microcuenca quebrada Cupiles de Quiles*



#### Cuadro 4

##### *Comparación de usos y coberturas de las microcuencas*

Usos y coberturas	Q. del Plan (ha)	Q. del Plan (%)	Q. Cupiles de Quiles (ha)	Q. Cupiles de Quiles (%)
Bosque de Coníferas Denso	135.5	38.4	244.4	25.4
Bosque de Coníferas Ralo	113.6	32.2	165	17.2
Pino Plagado	102.8	29.1	383.3	39.8
Pastos/Cultivos	1.1	0.3	169.1	17.6
Total del área	353.01		961.8	

Los usos y coberturas que presenta la quebrada del Plan (Figura 6) muestran que su mayor vegetación es de Bosque de Coníferas Denso y Bosque de Coníferas Ralo con un área de 135.5 ha y 113.6 ha respectivamente. Además, presenta 102.8 ha de Pino Plagado, sin embargo, el 75% de ellos se encuentran en fase de restauración por plantación. Por su parte, la quebrada Cupiles de Quiles (Figura 7) presenta 383.3 ha de Pino plagado, pero con regeneración natural, del mismo modo, presenta 244.4 ha de Bosque de Coníferas Denso y 165 ha de Bosque de Coníferas Ralo. Por otro lado,

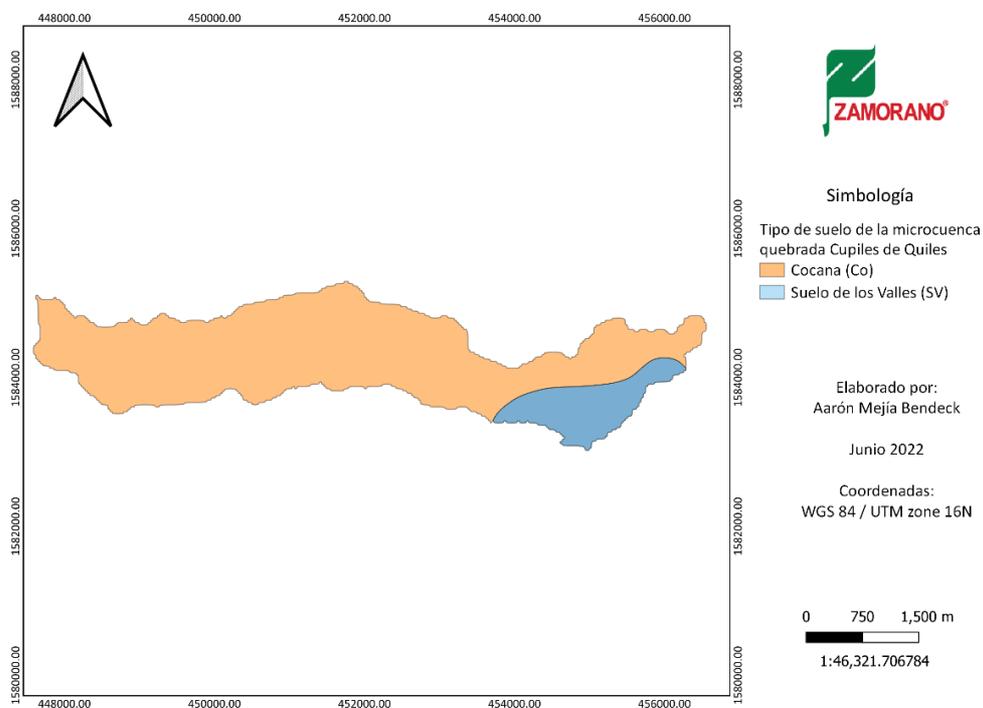
la quebrada Cupiles de Quiles presenta 169.1 ha de Pastos/Cultivos mientras que la quebrada del Plan únicamente cuenta 1.1 ha, factor altamente influyente en la retención de humedad del suelo.

### Geología y Tipo de Suelo

Las microcuencas estudiadas presentan dos variaciones de tipo de suelo. El tipo de suelo es la principal unidad cartográfica y por su carácter específico constituye normalmente la unidad edáfica a que se refieren los datos agronómicos y forestales. Para ello, se extrajo un shapefile de todos los tipos de suelos identificados en el país en escala de 1:250,000. Los suelos de Honduras 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. El tipo de suelo de ambas microcuencas pertenecen al grupo de suelos formados sobre depósitos aluviales (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación [FAO], 1969).

### Figura 8

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



De acuerdo con la clasificación de suelos de Honduras, se establece que la quebrada del Plan tiene un solo tipo de suelo. Según la (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación [FAO], 1969), el tipo de suelo predominante es Suelos de los Valles (SV), observado también en 123.4 ha (12.8%) de la superficie de la quebrada Cupiles de Quiles. Este tipo de suelo comprende la mayor parte de la superficie de la República, esparcido en todos los departamentos, especialmente en la zona céntrica del país. Se conoce que este tipo de suelo predomina ampliamente en los valles internos o entre montañas. Los SV tienen tres tipos de avenamiento, que van desde un buen drenaje, con profundidades por encima de 75 cm; drenaje regular, con profundidades entre 30-75 cm; y mal drenaje, con facilidad de inundación (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación [FAO], 1969).

En cuanto a al tipo de suelo presente en la quebrada Cupiles de Quiles, se observa (Figura 8) que existen dos tipos de suelos. El suelo Cocona (Co) es el principal régimen en la microcuenca con 838.41 ha (87.2%) del área total de la unidad, mientras que las hectáreas restantes corresponden al tipo Suelo de los Valles, completamente similar a la microcuenca del Plan. Los suelos Cocona también corresponden a la clase de suelos formados sobre depósitos aluviales son poco profundos, formados sobre ignimbritas de grano grueso, se encuentran en la parte central y occidental de la República, se clasifican como Grumusoles y tienden a ser de tipo Franco-arenoso (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación [FAO], 1969).

Como se observa, el tipo de suelo es diferente en la mayor parte de las microcuencas, lo que afecta el análisis de cuencas pareadas. Por ello, se optó por incluir la geología, variable que aumentó la clasificación de las microcuencas en pares, aunque no se encuentren físicamente cerca. A continuación, se muestran los mapas de geología de cada microcuenca.

Ambas microcuencas comparten el mismo tipo de geología, Grupo Geológico Padre Miguel (TPM). Según Cáliz (2011) el grupo TPM es originario de la era Cenozoica y se encuentra formado por rocas volcánicas ácidas y rocas volcánicas intermedias. Del mismo modo, Donnelly et al. (1991)

establecen que este grupo está constituido por capas intercaladas de ignimbritas, toba, riolitas laares, piroclastos y aglomerados con raras intercalaciones de flujos de andesitas y basaltos en los niveles superiores. Tanto la microcuenca quebrada del Plan como Cupiles de Quiles tienen el mismo grupo geológico en la totalidad de su terreno, factor importante para continuar con la metodología de las cuencas pareadas. A continuación, se muestra las áreas afectadas de las unidades de estudio (Cuadro 5).

### Cuadro 5

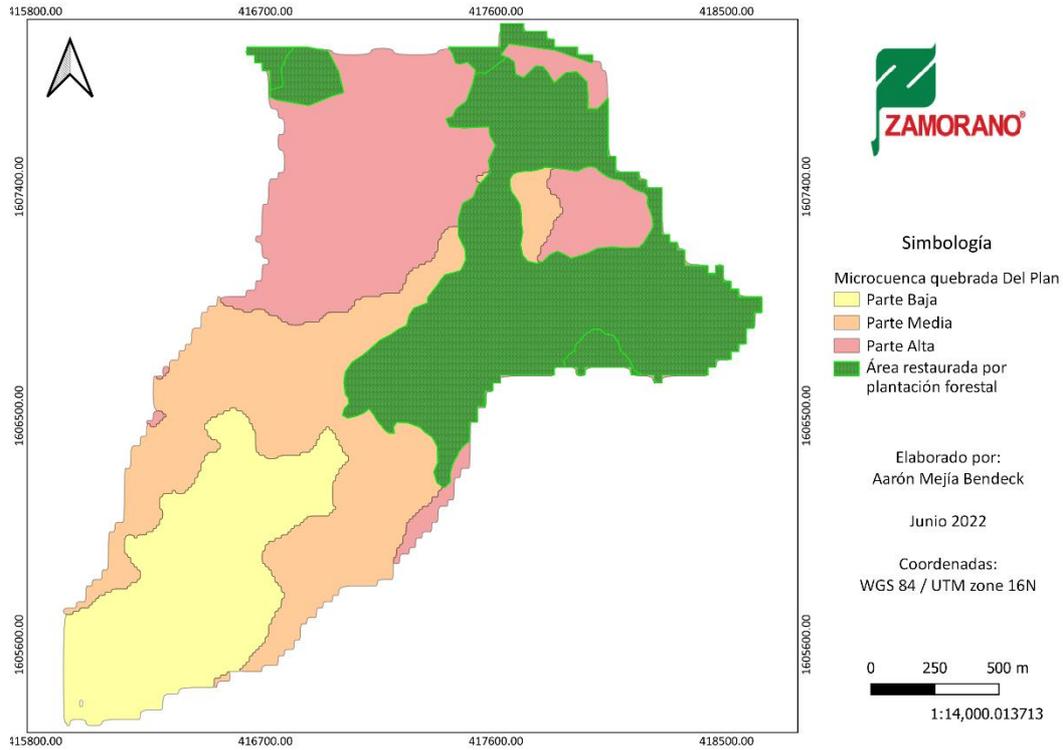
#### *Área plagada y restaurada de cada microcuenca*

Microcuenca	Área total de la microcuenca (Ha)	Área plagada (Ha)	Área plagada (%)	Área con plantación forestal (Ha)
Quebrada del Plan	353.01	145.52	41.2%	109.14
Quebrada Cupiles de Quiles	961.80	338.70	35.2%	Sucesión natural

El área total de la microcuenca quebrada del Plan es de 353.01 ha con un total de área afectada de 145.5 ha. En este contexto, un 41.2% del total de la unidad fue atacada por la plaga Gorgojo Descortezador de Pino, sin embargo, se restauraron con plantación de pino (*Pinus oocarpa* sp.) 109.1 ha afectadas (Figura 9) y actualmente continua la labor de restauración por plantación. Por otro lado, la microcuenca quebrada Cupiles de Quiles, tiene un área total de 961.8 ha y con una afectación por la plaga del 35.2%, es decir 338.7 ha, en esta no se realizaron actividades de plantación forestal, sin embargo, se encuentra bajo un método de regeneración natural por sucesión, es decir, no cuenta con acciones de mantenimiento, prevención de incendios, podas, entre otras. (Administración Forestal del Estado/Corporación Hondureña de Desarrollo Forestal, 2007) (Figura 10). Para ello se realizó una zonificación de las microcuencas mediante la extracción de altitudes y se clasificó las tres partes principales de las microcuencas: alta media y baja de cada una.

### Figura 9

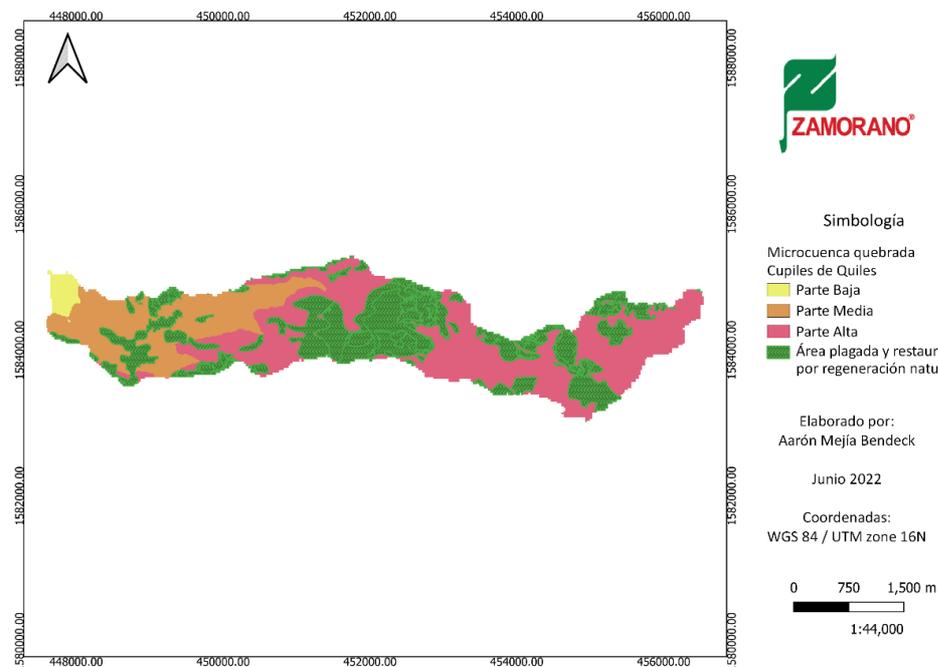
#### *Zonificación y área de tratamiento de plantación forestal en la microcuenca quebrada del Plan*



*Nota.* Los polígonos fueron generados por el técnico de monitoreo del indicador hídrico del proyecto Manejo Sostenible de Bosques, Oscar Fuentes (Comunicado personal).

**Figura 10**

*Zonificación y tratamiento de regeneración natural en la microcuenca quebrada Cupiles de Quiles*



*Nota.* Los polígonos fueron generados por el técnico de monitoreo del indicador hídrico del proyecto Manejo Sostenible de Bosques, Oscar Fuentes.

### Usos y coberturas respecto a la humedad del suelo

Para ello se realizó un conteo de las plantas de pino y especies latifoliadas dentro de una parcela de 25m<sup>2</sup>. Siguiendo con el método de parcelas anidadas, se extrajo otra parcela de 4m<sup>2</sup> dentro de la primera para cuantificar los brizales presentes en ambas microcuencas. Posteriormente, se tomó muestras de la vegetación menor arbustivas (gramíneas y pastos) en 1 m<sup>2</sup> en las microcuencas de estudio, se hizo una comparación de la biomasa presente, se calculó en peso húmedo y en peso seco tal como lo muestra el Cuadro 6.

### Cuadro 6

*Comparación de usos y coberturas mediante muestras in situ*

Microcuenca	Quebrada del Plan (Plantación)	Quebrada Cupiles de Quiles (Regeneración natural)
Numero de plantas de pino/hectárea	2120	1867
Altura promedio de planta de pino (cm)	29.2	150.4
Latizales y otras especies latifoliadas por hectáreas	133	667
Altura promedio de los latizales (cm)	287	383.2
Diámetro promedio de latizales (cm)	9.2	9.5
Brinzales/hectárea	21,667	63,333
Altura promedio de brinzales (cm)	222.1	84.7
Biomasa en peso húmedo (ton/ha)	5.46	1.62
Biomasa en peso seco (ton/ha)	4.12	0.97

Los datos obtenidos de ambas microcuencas indican que existe mayor cantidad de latizales y vegetación secundaria (brinzales), específicamente especies de hoja ancha, en la quebrada Cupiles de

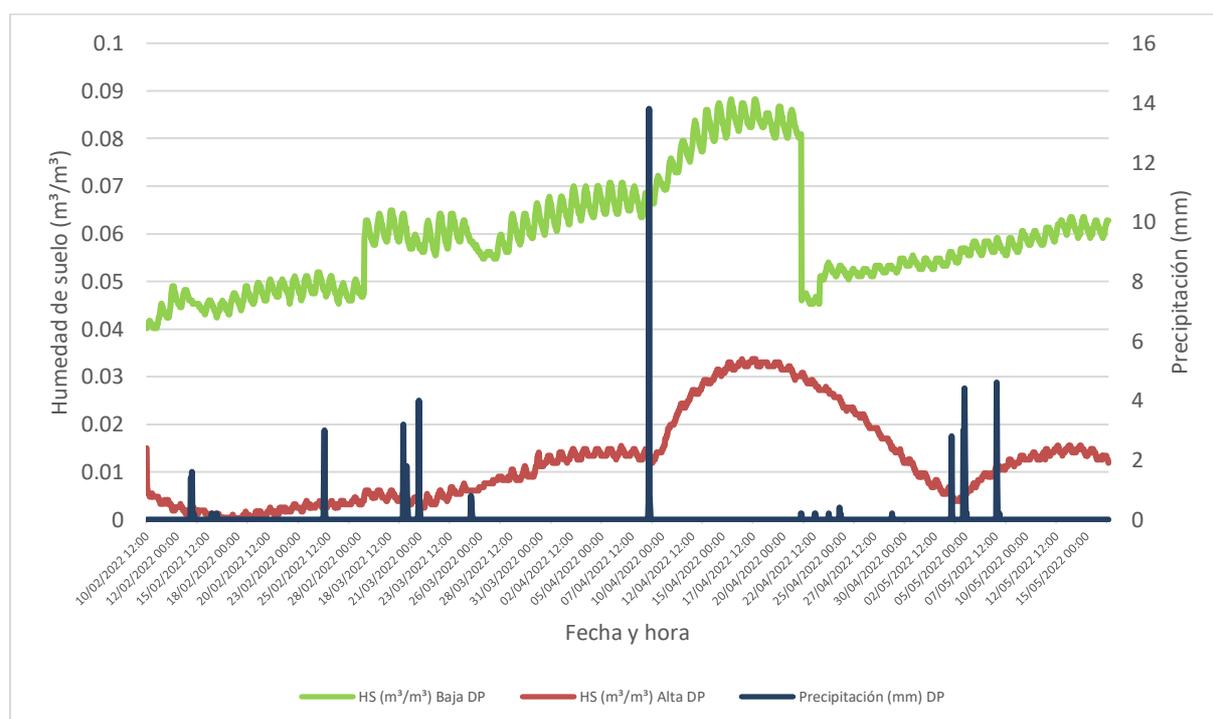
Quiles lo que se infiere como una mayor retención de humedad en comparación con la quebrada del Plan. Entre las principales especies de vegetación encontradas en las microcuencas están, Nance de Montaña (*Byrsonima crassifolia*), Algodoncillo (*Asclepias curassavica*), Guayabos (*Psidium guajava*) y Encinos (*Quercus* sp.), éstas especies retienen bastante humedad. Sin embargo, la microcuenca con plantación inducida presenta mayor cantidad de vegetación menor (pastos y gramíneas) en comparación con a microcuenca con regeneración natural.

### Retención de Humedad de Suelo

Los datos de humedad de suelo recolectados de forma horaria durante el periodo del 10 de febrero hasta el 16 de mayo del 2022 se presentan en las siguientes gráficas (Figura 11), donde se observan leves alteraciones en la humedad, sin embargo, se presenta un aumento de la variable dependiendo de la precipitación y las características de la vegetación secundaria. Como se menciona anteriormente, la quebrada Cupiles de Quiles presenta mayor cantidad de vegetación secundaria en comparación con la quebrada del Plan, factor referente para mayor retención de humedad del suelo.

**Figura 11**

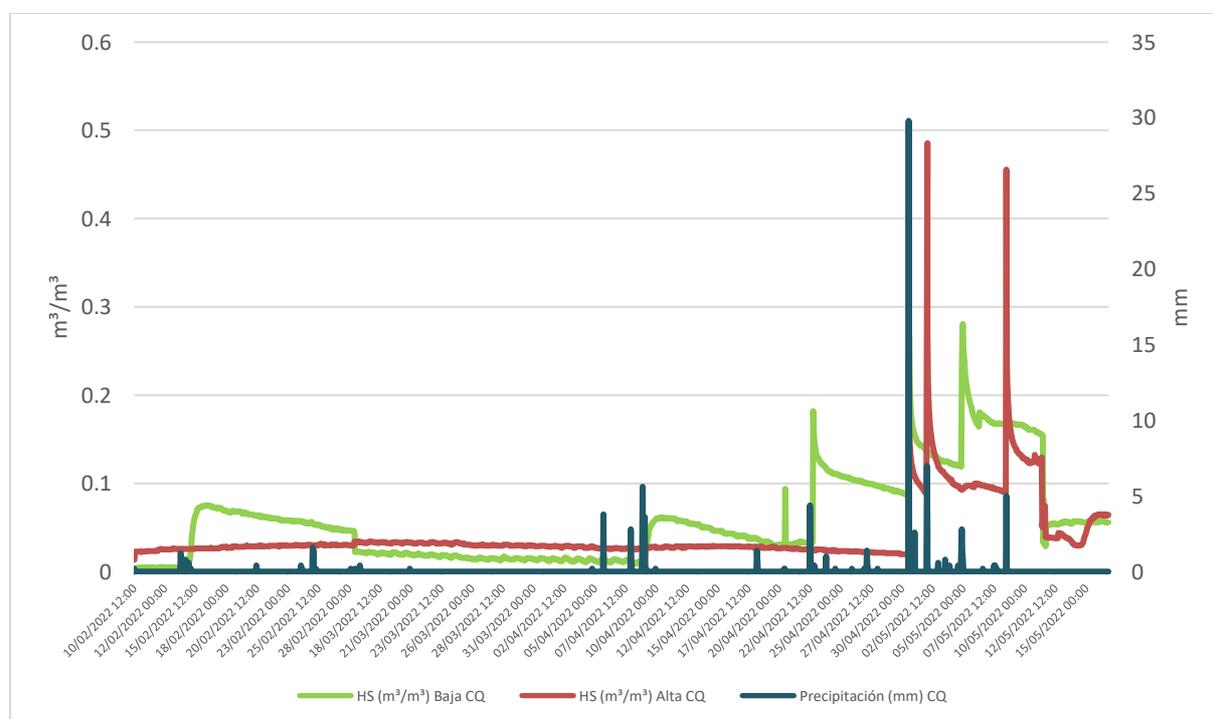
*Evolución de la humedad de suelo de la microcuenca quebrada del Plan.*



En Figura 11 se muestra un que la humedad de suelo (HS) de la parte baja es mayor comparado con la parte alta del área afectada de la microcuenca con reforestación por plantación de pino, cabe aclarar que la pendiente de la parte baja del área afectada donde se localiza el sensor es menor, siendo una variable importante en la retención de humedad. Del mismo modo, se observa que la precipitación influye directamente en el aumento de la humedad, ya que cuando existen lecturas mayores a cero en la variable de precipitación, se incrementa la humedad del suelo.

**Figura 12**

*Evolución de la humedad de suelo de la microcuenca quebrada Cupiles de Quiles.*



Los datos obtenidos de la retención de humedad de suelo (HS) en la microcuenca quebrada Cupiles de Quiles (Figura 12), con regeneración natural, indican que tanto en la parte alta como en la parte baja de la microcuenca presentan un comportamiento normal y bastante similar, sin embargo, en la parte alta del área afectada de Cupiles de Quiles se muestra una respuesta de mayor sensibilidad en la humedad por la precipitación, presentando picos mayores a los que se observan en la parte baja de la humedad, esto puede ser debido a mayores lluvias presentes y al tipo de vegetación que presentan, la vegetación tanto en la parte alta como en la parte baja de las áreas afectadas es igual.

La precipitación tiene un papel importante para la retención de humedad de suelo derivado del tipo de cobertura de la microcuenca. El 30 de abril del 2022 se registró la mayor precipitación evaluada con 29.8 mm, lo que generó un aumento significativo en la medición de la humedad de suelo principalmente en la parte baja del área afectada obteniendo su pico más alto dos días posteriores a la precipitación con valores de 49%.

### **Comparación de Humedad del Suelo (HS) en Microcuencas**

Los datos obtenidos de la medición de humedad de suelo en la parte alta del área afectada de las dos microcuencas presentan una correlación espacial. Por tanto, los datos fueron analizados mediante el modelo: Lineales Generalizados Mixtos (MLGM).

El análisis de varianza resultante indicó que si existe diferencias significativas ( $P < 0.001$ ) en la comparación de la parte alta del área afectada de la microcuenca quebrada del Plan y quebrada Cupiles de Quiles. Los datos presentados en el Cuadro 7 demuestran que existe mayor retención de humedad de suelo en la microcuenca con regeneración natural. Esto puede ser ocasionado debido que la microcuenca quebrada del Plan con tratamiento de reforestación por plantación no tiene tanta densidad de vegetación durante su primer año.

### **Cuadro 7**

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

Microcuenca	Humedad	
Quebrada del Plan	0.05 ± 0.02	b
Cupiles del Quiles	0.08 ± 0.02	a

Según Bonnesoeur et al. (2019) las cuencas con plantaciones generan menor rendimiento hídrico (entre 20 y 45%) que las cuencas con uso de suelo no forestado. Resultados similares fueron reportados por Muñoz-Villers et al. (2015) donde refiere que durante eventos de precipitación la respuesta hidrológica de pastizales y bosques mesófilos en regeneración fue mayor comparada con la

de los bosques mesófilos maduros. Consecuentemente, el rendimiento hídrico anual fue mayor en los pastizales y el bosque en regeneración natural, comparado con los bosques mesófilos maduros.

De esta manera los resultados de este estudio demuestran normalidad. Aunque la regeneración natural no cuenta con elevado número de pastizales, si posee más brinzales y latizales de mayor altura jugando un papel relevante en la retención de humedad de suelo en comparación con la microcuenca con plantación donde existe cierta intervención de la capa continua de vegetación secundaria.

### **Cuadro 8**

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

Microcuenca	Humedad	
Quebrada del Plan	0.07 ± 0.0049	a
Cupiles del Quiles	0.07 ± 0.0049	a

Los resultados obtenidos en la parte baja del área afectada de las microcuencas indican que no existe diferencia significativa en la retención de humedad de suelo ( $P > 0.32$ ). Por tal razón existe la probabilidad que las alteraciones antrópicas y los parámetros morfométricos de la parte baja del área afectada de las microcuencas presenten influencia directa en los resultados.

Resultados similares observó Amparito et al. (2018) donde explica que los parámetros hidrológicos pueden verse sometidos por perturbaciones antrópicas, las cuales aplican en la localización de los sensores de humedad para ambas microcuencas. Del mismo modo, afirma que las coberturas boscosas y la regeneración natural son reguladoras de las respuestas hidrológicas de las microcuencas. Asimismo, la vegetación secundaria favorece la captación, infiltración, almacenamiento y regulación de la humedad, gracias a la producción de hojarasca y otros detritos que forman una base de absorción sobre el suelo mineral y actúan en la retención y regulación hídrica.

### Conclusiones

Las microcuencas comparten el mismo tipo geológico y similitud en el uso y cobertura del suelo, variables que se tomaron en cuenta para la metodología de cuencas pareadas, sin embargo, la microcuenca quebrada del Plan, con un 42.2% de afectación por la plaga gorgojo de pino, se encuentra bajo su primer año de plantación inducida, mientras que la quebrada Cupiles de Quiles con un 35.2% de afectación, se encuentra en su cuarto año de regeneración natural. Ambas microcuencas son subsistemas pequeños de forma oblonga con coeficientes de Gravelius de 1.79 y 2.59 y cobertura de suelo predominante de pino de 99.7% para quebrada del Plan y 82.5% para quebrada Cupiles de Quiles.

Los registros de humedad de suelo presentados durante el periodo del 10 de febrero al 05 de mayo demuestran una baja retención de humedad, sin embargo, para el mismo evento de precipitación se muestra mayor retención de humedad de suelo en la microcuenca quebrada Cupiles de Quiles, la cual se encuentra en regeneración natural con predominancia de vegetación de especies latifoliadas.

La quebrada Cupiles de Quiles presentó mayores índices de retención de humedad de suelo en la parte alta del área afectada de las microcuencas, debido a que presentó mayor densidad de vegetación secundaria y especies de hoja ancha (latizales y brinzales). Sin embargo, la regeneración natural presentó menos plantas de pinos que la plantación inducida y se reportó menor cobertura vegetal baja (pastos y gramíneas) en la quebrada del Plan.

### **Recomendaciones**

Se debe continuar con la evaluación de las microcuencas de estudio, por lo menos por un periodo de tres a cinco años, para observar la respuesta en humedad de suelo con respecto a las coberturas y los diferentes métodos de restauración.

Tomar en consideración los datos recolectados en la época húmeda del año y comparar el comportamiento de la humedad del suelo con respecto a la magnitud de eventos unitarios de precipitación.

Realizar las evaluaciones de la plantación forestal y restauración natural al menos una vez al año para determinar el porcentaje de sobrevivencia de la plantación en quebrada del Plan y actualizar el inventario de la regeneración en microcuenca Cupiles de Quiles.

Se recomienda actividad constante en la adición de nuevas variables hidrológicas como el caudal, el cual debe medirse en puntos de salida de las microcuencas durante los años posteriores, ya que en este estudio se midió únicamente la variable de humedad del suelo, debido a que las prácticas de reforestación presentes se encuentran en su primer año de ejecución.

## Referencias

- Administración Forestal del Estado/Corporación Hondureña de Desarrollo Forestal. (2007). *Guía Metodológica para la Formulación de Mapas Temáticos, Áreas Críticas y Zonificación para Planes de Manejo en Cuencas y Microcuencas Hidrográficas*.
- Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio. (2022). *Earth Data NASA*.  
<https://www.earthdata.nasa.gov/>
- Amparito, L., Armijos, J., Jaramillo, N. y Peña, J. (2018). Regeneración natural en zonas alteradas e identificación de especies forestales potenciales para recuperación hídrica en la microcuenca del río Jipiro, Loja, Ecuador. *Bosques Latitud Cero*, 8(2), 51–63.  
<https://revistas.unl.edu.ec/index.php/bosques/article/view/494>
- Aumassane, C. M., Gaspari, F. J., Bege, M. E., Sartor, P. D., Oricchio, P. y Di Bella, C.M. (2018). *Morfometría de la cuenca alta del río Colorado, Argentina* [Boletín Geográfico]. Universidad Nacional del Comahue, Buenos Aires, Argentina.  
<http://170.210.83.53/index.php/geografia/article/view/2056/59286>
- Banco Interamericano de Desarrollo. (s. f.). *Manejo Sostenible de Bosques (HO-L1179)*.  
[https://ewdata.rightsindevelopment.org/files/documents/79/IADB-HO-L1179\\_OvErmMt.pdf](https://ewdata.rightsindevelopment.org/files/documents/79/IADB-HO-L1179_OvErmMt.pdf)
- Bandera, E. y Pérez, L. (2018). *Los modelos lineales generalizados mixtos. Su aplicación en el mejoramiento de plantas* (1) [Revisión bibliográfica]. Universidad de La Habana, Cuba.  
[http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0258-59362018000100019](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0258-59362018000100019)
- Belalcázar Benavides y Ortega Bolaños, M. (2018). *Evaluación de la sostenibilidad de la subcuenca hidrográfica La Fragua ubicada en el departamento de Nariño, mediante cuatro indicadores:*

- Hidrología, Medio Ambiente, Vida y Política* [Publicación universitaria]. Universidad de Manizales, Colombia. <https://ridum.umanizales.edu.co/xmlui/handle/20.500.12746/3654>
- Billings, R. (2016). *Evaluación del Programa de Control Directo de la Plaga del Gorgojo del Pino y Establecimiento de un Programa Permanente de Sanidad Forestal*.
- Billings, R., Clarke, S. R., Espino, J. V. y Cordón, B. (2004). *Bark beetle outbreaks and fire: a devastating combination for Central America's pine forests*. <https://www.fao.org/3/y5507e/y5507e05.htm>
- Bonnesoeur, V. V., Locatelli, B. y Ochoa-Tocachi, B. (2019). Impactos de la Forestación en el Agua y los Suelos de los Andes: ¿Qué sabemos? *Hal Open Science*, 2. <http://hal.cirad.fr/cirad-02052862>
- Cálix, R. (2011). Marco Geológico del Mapa Matalogenético de Honduras.
- Campbell, J. L., Yanai, R. D., Green, M. B., Likens, G. E., See, C. R., Bailey, A. S., Buso, D. C. 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. C. y Spooner, J. (1993). *Paired watershed study design: Environmental Protection Agency, Washington, DC (United States). Office of Wetlands, Oceans and Watersheds* [Technical Report], United States.
- Comisionado Nacional de los Derechos Humanos y Defensoría Nacional del Medio Ambiente. (2016). *El gorgojo descortezador del pino y otras graves amenazas ambientales a la vida digna de los hondureños y hondureñas*. Instituto Nacional de Conservación y Desarrollo Forestal Áreas Protegidas y Vida Silvestre. <http://app.conadeh.hn/descargas/InformesEspeciales/Informe-Especial-Gorgojo-del-Pino-y-Amenazas-Ambientales.pdf>
- Donnelly, T. W., Home, G. S., Finch, R. C. y López-Ramos, E. (1991). Northern Central America; The Maya and Chortis blockse. En G. Dengo y J.E. Case (Eds.), *The Caribbean Region* (Vol. 94, pp. 37–76). Geological Society of America. <https://doi.org/10.1130/DNAG-GNA-H.37>

- Farley, K. A., Piñeiro, G., Palmer, S. M., Jobbágy, E. G. y Jackson, R. B. (2008). Stream acidification and base cation losses with grassland afforestation. *Water Resources Research*, 44(7), 245. <https://doi.org/10.1029/2007WR006659>
- Faustino, J. y Jiménez, F. (2000). *Manejo de cuencas hidrográficas*. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), Costa Rica.
- Hernández, A. J. (s.f.). *Apoyo a la modelación de emisiones de indicadores de carbono e hídricos de proyectos BID 3878/BL-HO y HO-L1200/HO-G1252: Plan de trabajo*.
- Jobbágy, E. G., Acosta, A. M. y Noretto, M. D. (2013). *Rendimiento hídrico en cuencas primarias bajo pastizales y plantaciones de pino de las sierras de Córdoba (Argentina)*. Argentina. Asociación Argentina de Ecología. [http://ojs.ecologiaaustral.com.ar/index.php/Ecologia\\_Austral/article/view/1164/558](http://ojs.ecologiaaustral.com.ar/index.php/Ecologia_Austral/article/view/1164/558)
- Loftis, J. C., MacDonald, L. H., Streett, S., Iyer, H. K. 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)
- Martínez-González, F., Sosa, F. y Ortiz, J. (2010). *Comportamiento de la humedad del suelo con diferente cobertura vegetal en la Cuenca La Esperanza (4)*. Universidad de Guanajuato, México, México. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2007-24222010000400005](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222010000400005)
- Muñoz-Villers, L. E., Holwerda, F., Alvarado-Barrientos, M. S., Geissert, D., Marín-Castro, B., Gómez-Tagle, A., McDonnell, J., Asbjornsen, H., Dawson, T. y Adrian Bruijnzeel, L. (2015). Efectos hidrológicos de la conversión del bosque de niebla en el centro de Veracruz, México. *Bosque (Valdivia)*, 36(3), 395–407. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002015000300007>
- Navarro González, M. E. (2018). *Desarrollo de un modelo para la identificación de áreas con riesgo de ataque del gorgojo descortezador de pino (Dendroctonus adjunctus) en los departamentos de*

- Quetzaltenango y Totonicapán, Guatemala*. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), Costa Rica. <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/8761>
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. (1969). *Los suelos de Honduras: Informe al Gobierno de Honduras*.
- Richard, F. (2016). *Estimación de los efectos del cambio de uso del suelo sobre el comportamiento hidrológico de la cuenca del arroyo Cabana* [Trabajo académico integrador]. Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. <http://hdl.handle.net/11086/4658>
- Rivera, S. (2021). *Consultoría de apoyo en la instrumentalización para el monitoreo del indicador hídrico de los proyectos Consultoría de apoyo en la instrumentalización para el monitoreo del indicador hídrico de los proyectos BID 3878/BL-HO y HO-L1200/HO-G1252: Reporte de asesoramiento en la selección de microcuencas*.
- Rosales, J. (1998). *Sistema de clasificación de tierras por su capacidad de uso para la cuenca hidrográfica*. Honduras.
- Spittlehouse, D. L. (2005). Integrating climate change adaptation into forest management. *The Forestry Chronicle*, 81(5), 691–695. <https://doi.org/10.5558/tfc81691-5>
- Ssegane, H., Amatya, D. M., Chescheir, G. M., Skaggs, W. R., Tollner, E. W. y Nettles, J. E. (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>
- 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. Taiwan International Cooperation and Development Fund (ICDF). <https://icf.gob.hn/gestion-forestal-para-el-manejo-de-plagas/>
- Vásquez-Cortez, V. F., Clark-Tapia, R., Manzano-Méndez, F., González-Adame, G. y Aguirre-Hidalgo, V. (2018). Estructura, composición y diversidad arbórea y arbustiva en tres condiciones de

manejo forestal de Ixtlán de Juárez, Oaxaca. *Madera Y Bosques*, 24(3).

<https://doi.org/10.21829/myb.2018.2431649>

## Anexos

### Anexo A

*Sensor de Temperatura y Humedad del Suelo: HOB0 EC5 Soil Moisture ubicado en la parte alta del área afectada de la microcuenca quebrada Cupiles de Quiles.*



**Anexo B**

*Pluviómetro métrico: RainGauge 0.2 mm with pendant RG3-M ubicado en la parte baja del área afectada de la microcuenca quebrada Cupiles de Quiles.*



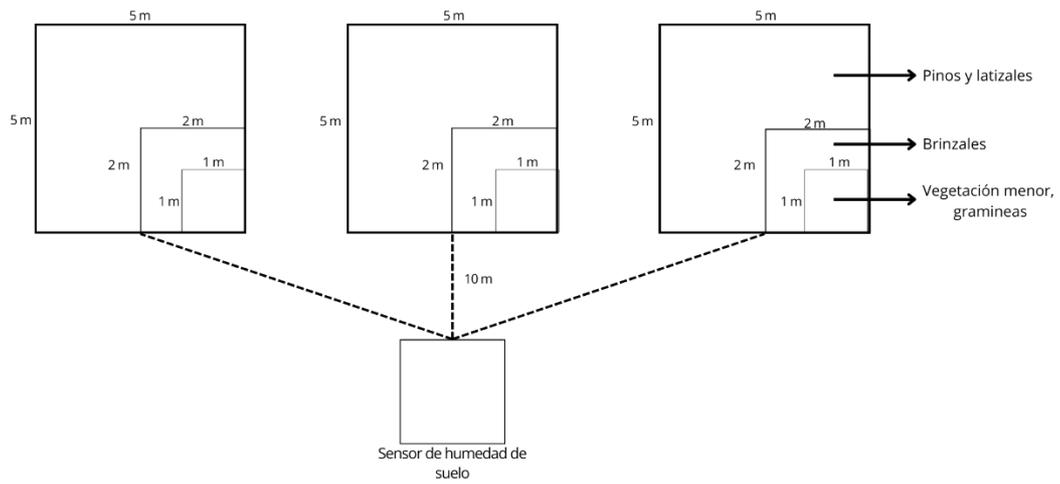
**Anexo C**

*Grabador de Datos y Software HOBO Waterproof Shuttle ubicado en la parte baja del área afectada de la microcuenca quebrada Cupiles de Quiles.*



**Anexo D**

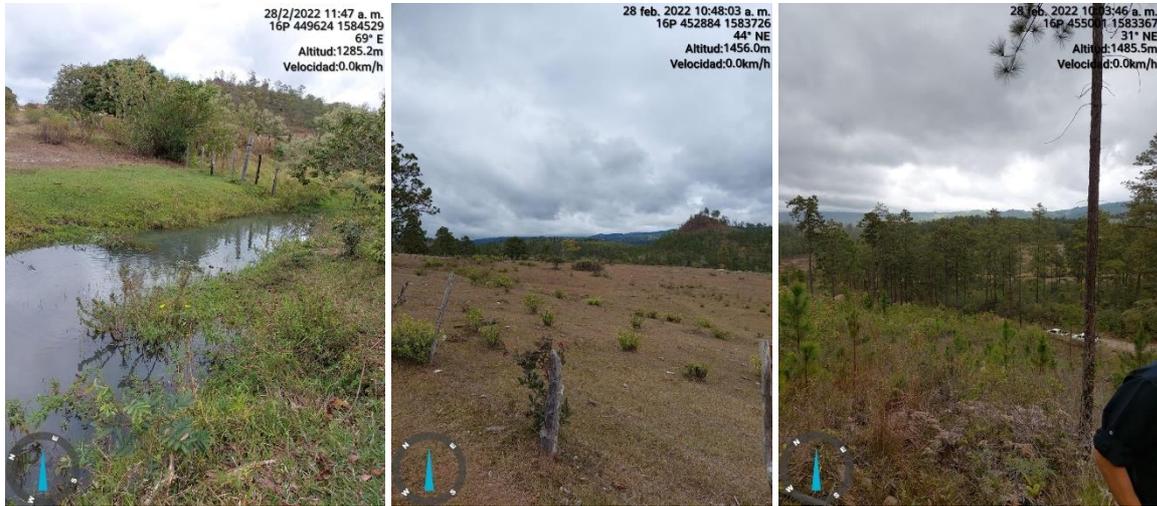
*Método de parcelas anidadas para caracterización in situ para las microcuencas*



**Anexo E***Visita a campo de la microcuenca quebrada del Plan*

Anexo F

Visita a campo de la microcuenca quebrada Cupiles de Quiles.



### Anexo G

#### *Recolección de datos de humedad de suelo en las microcuencas*

