

**“APOYO SIG Y DE MODELACIONES PARA LA ELABORACIÓN DEL PLAN ESTRATÉGICO DE
GESTIÓN SOSTENIBLE DEL BOSQUE, SUELO Y AGUA PARA LA ADAPTACIÓN AL CAMBIO
CLIMÁTICO”**

**REPORTE SIMULACIÓN CON LA HERRAMIENTA PARA LA EVALUACIÓN DE SUELOS Y AGUAS
SWAT**

ALEXANDER J. HERNÁNDEZ

TELEDETECCIÓN Y SIMULACIÓN ECOLÓGICA

Contenido

1. ACTIVIDAD 1: SIMULACIÓN CON LA HERRAMIENTA PARA LA EVALUACIÓN DE SUELOS Y AGUAS SWAT	3
1.1 DESCRIPCIÓN DE ACTIVIDAD	3
1.2 MÉTODOS	3
1.2.1 SELECCIÓN DE SUB-CUENCAS	3
1.2.2 EL MODELO SWAT – BASE TEÓRICA ABREVIADA	4
1.2.3 INSUMOS UTILIZADOS Y PROCESAMIENTO	11
1.2.4 PROCESOS PRINCIPALES Y SALIDAS EN EL USO DEL MODELO	14
1.2.5 PROCESAMIENTO DE LA SIMULACIÓN:	15
1.3 RESULTADOS EN SWAT	15
1.3.1 OBTENCIÓN DE UN INDICADOR DE DISMINUCIÓN EN LA PRODUCCIÓN DE AGUA COMO EFECTO DE LOS ATAQUES DEL GORGOJO EN BOSQUE DE CONÍFERAS	16
1.3.2 ÁREAS SIMULADAS EN SWAT	16
1.3.3 IMPACTO DEL CAMBIO DE COBERTURA EN LAS ZONAS PLAGADAS: VOLUMEN PERDIDO POR UNIDAD DE ÁREA	17
1.3.4 RECUPERACIÓN DEL VOLUMEN PERDIDO VÍA IMPLEMENTACIÓN DEL PROYECTO	19
1.4 DISCUSIÓN	21
1.5 REFERENCIAS	22

Lista de Figuras

Fig.1. Subcuencas siendo utilizadas durante las fases de análisis del estudio en el contexto de la República de Honduras y los brotes de gorgojo reportados por el Instituto de Conservación Forestal	4
Figura. 2. Modelo esquemático de la fase terrestre del SWAT. Tomado de Neitsch et al., 2009.	7
Figura. 3. Descripción gráfica de los principales componentes del balance de agua	11
Fig. 4. Unidades de muestreo de suelos según base de datos de la DEC y base de atributos de las calicatas de suelo asociadas a las poligonales	13
Fig. 5. Distribución espacial de las unidades de drenaje piloto simuladas con SWAT en el contexto de las subcuencas priorizadas	17
Fig. 6. Comportamiento temporal de la recuperación del volumen perdido como consecuencia de los ataques de gorgojo. (a) Volumen total a recuperar CON y SIN proyecto, (b) Volumen diferencial CON vs. SIN proyecto	20

Lista de Cuadros

Cuadro 1. Tipo de resultados a considerar del SWAT	16
Cuadro 2. Indicadores para las cuencas piloto simuladas en SWAT	18

1.Actividad 1: Simulación con la herramienta para la evaluación de suelos y aguas SWAT

1.1 Descripción de Actividad

Realizar escenarios de efectos de cambios de uso de la tierra en la producción de agua con el modelo SWAT en subcuencas que han sido atacadas por el gorgojo y que serán controladas silviculturalmente en el marco del programa HO-L1179. Potencialmente en estas zonas pueden suceder cambios temporales o permanentes del uso de bosques productivos o de protección a usos más intensivos como agricultura o ganadería extensiva.

El modelo hidrológico debe correrse para las subcuencas para:

- Escenarios con cobertura forestal previo al daño de los ataques de gorgojo y;
- Escenarios donde se integran las zonas afectadas por ataques de gorgojo

1.2 Métodos

1.2.1 Selección de sub-cuencas

La primera aproximación para seleccionar las zonas piloto en las que se utilizaría el modelo SWAT consistió en revisar los datos del balance hídrico de Honduras (Balairón Pérez et al., 2003)¹. A partir de los productos geospaciales (específicamente un shapefile de subcuencas con atributos tabulares que describen la oferta de agua natural y demandas mensuales con temporalidad a los horizontes de los años 2003 y 2025) se seleccionaron originalmente 111 unidades en las que se encontraron déficits hídricos severos durante la época de estiaje que generalmente comprende desde Noviembre a Abril. Estas 111 unidades fueron intersectadas espacialmente con la máscara de ataques (activos e inactivos) de gorgojo proporcionada por el Instituto de Conservación Forestal (ICF) para realizar una priorización de aquellas subcuencas con déficits en el balance de aguas y que simultáneamente tenían insertos poligonales de ataque de gorgojo. Esta segunda aproximación dejó 75 unidades como subcuencas candidatas para implementar escenarios con el modelo SWAT. Ver figura 1.

¹ https://www.researchgate.net/publication/258291968_Balance_Hidrico_en_Honduras

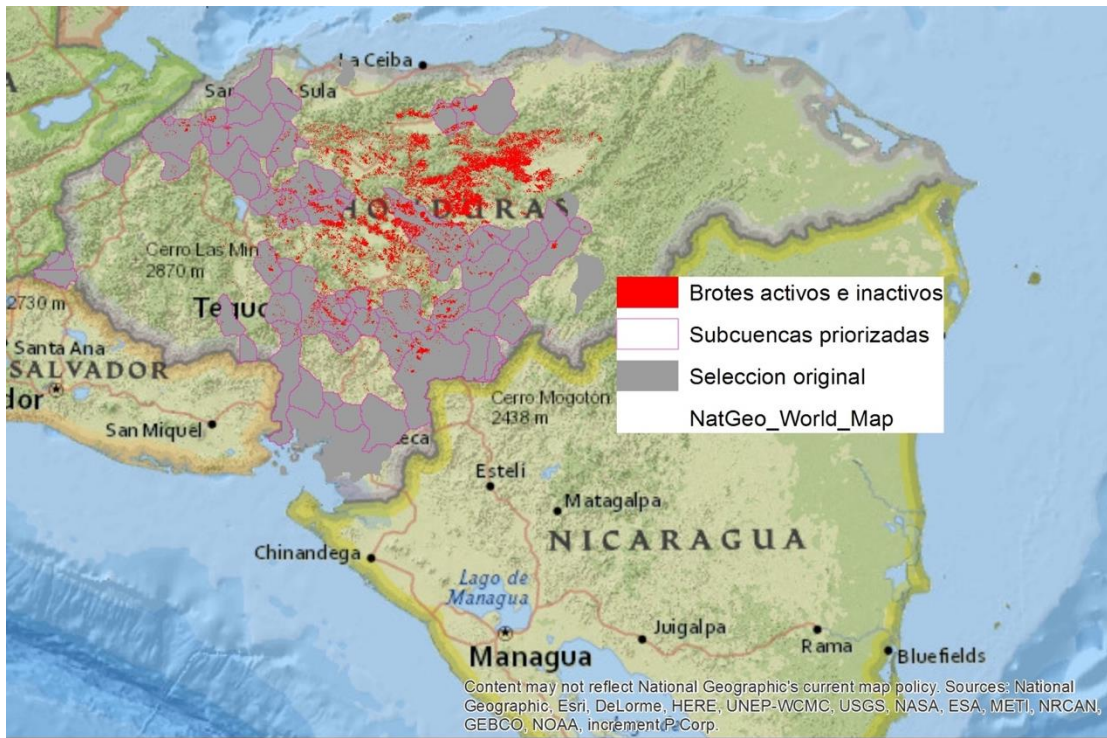


Fig.1. Subcuencas siendo utilizadas durante las fases de análisis del estudio en el contexto de la República de Honduras y los brotes de gorgojo reportados por el Instituto de Conservación Forestal

A partir de las 75 unidades se inició un proceso de captura de datos geospaciales y tabulares que son requeridos para una corrida exitosa del SWAT. Esta fase de adquisición y preparación de datos se priorizó en aquellas subcuencas con una mayor proporción relativa de su área total que había sido afectada por ataques de gorgojo.

1.2.2 El Modelo SWAT – Base teórica abreviada

SWAT es el acrónimo en inglés para Soil and Water Assessment Tool. Acorde a la literatura consultada, esta herramienta está siendo utilizada para el análisis del impacto hidrológico por los cambios en el uso del suelo en diferentes regiones tropicales con éxito. La siguiente descripción básica del modelo se obtuvo de (Dile et al., 2016; Neitsch et al., 2011; Winchell et al., 2007)²³.

² http://swat.tamu.edu/media/115179/qswat-manual_v13.pdf

³ <http://swat.tamu.edu/media/99192/swat2009-theory.pdf>

Para la modelación, SWAT divide la cuenca en subcuencas, al hacerlo se diferencian áreas lo suficientemente diferentes en suelos o usos para impactar la hidrología del área de estudio. La información para cada subcuenca se agrupa u organiza en categorías de clima, unidades de respuesta hidrológica URH, reservorios, agua subterránea y el cauce principal. Las URH son áreas que comprenden características únicas de cobertura de la tierra, tipo de suelo, topografía del terreno y condiciones de manejo. La base conceptual del modelo para indicar lo que pasa en la cuenca es predecir el comportamiento del ciclo hidrológico. Los procesos principales se dividen en dos etapas: fase terrestre del ciclo hidrológico y la fase hídrica o de desplazamiento del ciclo hidrológico.

Fase terrestre: En esta etapa el modelo calcula la cantidad de agua, sedimentos y concentraciones de nutrientes que son descargadas al cauce principal procedentes de cada subcuenca. Los insumos necesarios son: datos de precipitación diarios de por lo menos los últimos 5 años, uso de la tierra, tipos de suelos, modelo digital de elevación y red hidrológica.

El ciclo hidrológico es simulado por SWAT basado en la ecuación del balance hídrico:

$$SW_t = SW_o + (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw})$$

Donde SW_t es el contenido final de agua en el suelo (mm H_2O), SW_o es el contenido inicial de agua y suelo en el día i (mm H_2O), t es el tiempo (días), R_{day} es la cantidad de precipitación en un día i (mm H_2O), Q_{surf} es la cantidad de escorrentía superficial en un día i (mm H_2O), E_a es la cantidad de evapotranspiración en un día i (mm H_2O), W_{seep} es la cantidad de agua entrando la zona vadosa en un perfil del suelo en un día i (mm H_2O), y Q_{gw} es la cantidad de flujo de retorno en un día i (mm H_2O).

La subdivisión de la cuenca permite al modelo reflejar diferencias en evapotranspiración para varios cultivos y suelos. La escorrentía se estima separadamente para cada URH y puesta en ruta para obtener la escorrentía total de la cuenca. Esto incrementa la precisión y da una mejor descripción física del balance de agua. El volumen de escorrentía superficial se calcula usando una modificación del método de número de curvas SCS (Servicio de Conservación de Suelos USDA) o el método de infiltración Green & Ampt. En el método de número de curvas, las curvas varían de manera no lineal con el contenido de humedad del suelo. El método Green & Ampt requiere datos de precipitación diaria y calcula la infiltración como una función matriz

potencial y conductividad hidráulica efectiva. Así, el agua que no logra infiltrarse se convierte en escorrentía superficial. La erosión y sedimentos son estimados para cada URH con el modified universal soil loss equation o ecuación universal modificada de pérdida de suelo (MUSLE). La MUSLE usa la cantidad de escorrentía para simular erosión y sedimentos. La sustitución resulta en un número de beneficios: la predicción con precisión del modelo se incrementa y la estimación de los sedimentos de una sola tormenta puede ser calculada. El modelo hidrológico ofrece estimados de volumen de escorrentía y tasas máximas de escorrentía, las cuales, con el área de la subcuenca, son usados para calcular la variable de energía erosiva de la escorrentía. El factor de manejo de cultivos es recalculado cada día que la escorrentía ocurre. Ver figura 2.

Fase hídrica: Esta fase comprende el movimiento del agua, sedimentos, etc. A través de la red de canales o cauces en la cuenca hasta su salida o punto de aforo. El Desplazamiento en el cauce principal puede dividirse en cuatro componentes: agua, sedimentos, nutrientes y químicos orgánicos. Para los fines del presente trabajo de investigación se presentarán los dos primeros:

Agua: Con el flujo del agua pendiente abajo, una porción puede perderse debido a evaporación y transmisión a través del lecho del cauce. Otra pérdida potencial se debe a la remoción del agua del cauce para uso agrícola o humano. El caudal puede ser suplementado por la lluvia caída directamente sobre el cauce y la proveniente de fuentes puntuales. El flujo es dirigido a través del cauce usando un método variable de coeficientes de almacenamiento.

Sedimentos: El transporte de sedimentos en el cauce es controlado por la operación simultánea de dos procesos: deposición y degradación. El SWAT utiliza ecuaciones simplificadas y la cantidad máxima de sedimentos que puede ser transportada desde un segmento es una función de la velocidad máxima del cauce. La energía de la corriente disponible es usada para reentrar el material suelto y depositado hasta que todo el material sea removido. El exceso de energía de la corriente causa degradación del lecho del cauce. La degradación del lecho es ajustada por la erodabilidad del lecho de la corriente y su cobertura.

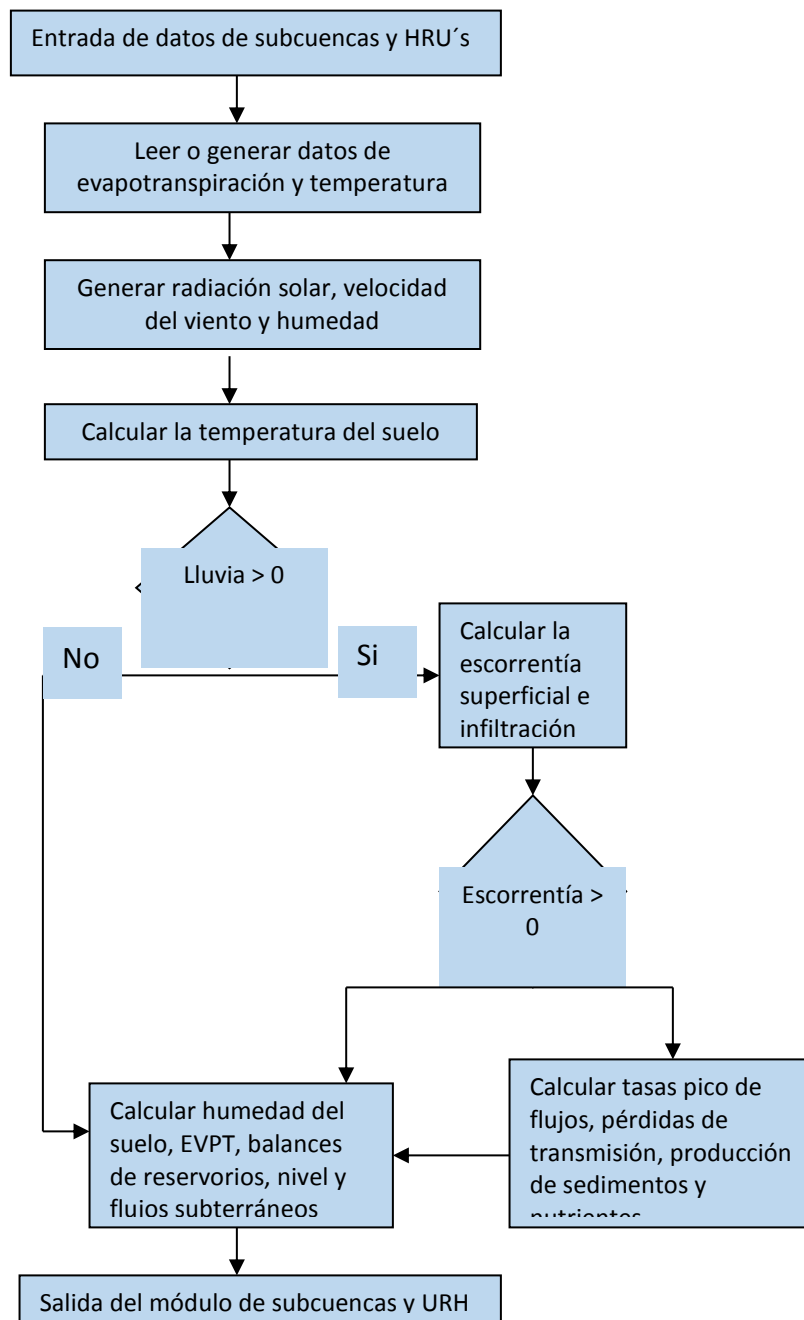


Figura. 2. Modelo esquemático de la fase terrestre del SWAT. Tomado de Neitsch et al., 2009.

Algunas de las fórmulas más importantes utilizadas por SWAT.

Escorrentía superficial: es la porción de la lluvia que cae y fluye sobre el suelo en zonas de ladera ó de pendiente. Se origina por dos formas: (a) por las lluvias de baja intensidad y larga duración que saturan el suelo y en consecuencia, el agua al no poder penetrar en el suelo (infiltrarse) fluye por la superficie pendiente abajo por la vía de menor resistencia; o (b) por las

lluvias de alta intensidad que sobrepasan la capacidad de infiltración del suelo y por ende se desliza superficialmente el agua en exceso.

La esorrentía es estimada por medio de la metodología del número de la curva establecida por el Servicio de Conservación de Suelos SCS-USDA de los EEUU, con datos de lluvia diarios.

Esta ecuación se fundamenta en que la esorrentía es el agua que no logra infiltrarse en el suelo y por ende está determinada por el tipo de suelo, la cobertura del suelo o tipo de uso y la práctica de manejo que en éste se realice.

Ecuación para el cálculo de la esorrentía superficial:

$$Q = \frac{(R - 0.2s)^2}{(R + 0.8s)}, R > 0.2s$$

$$S = 254 \frac{(100 - 1)}{(CN)}$$

Donde:

Q = Escurrimiento diario

R = Lluvia diaria

S = Parámetro de retención en mm

CN = Número de la curva

Para este parámetro SWAT hace correcciones por pendiente ya que éste está descrito para una pendiente de 5%.

Infiltración: el agua que penetra en el suelo ó infiltración puede tomar varios caminos: (a) Incrementar la humedad del suelo, (b) moverse superficialmente como flujo lateral hacia los canales de drenaje, (c) recargar acuíferos poco profundos donde esta agua también llegará hasta los canales de drenaje (flujos de retorno) y (d) recargar acuíferos profundos.

Flujo lateral: es el agua que se mueve por debajo de la superficie del suelo y sobre el nivel de los acuíferos, la cual sube subsuperficialmente y alimenta los canales de drenaje, quebradas y ríos. En SWAT el flujo lateral es calculado simultáneamente con la percolación para el suelo entre (0-20cm) mediante un modelo de almacenamiento cinético, que usa la ecuación de conservación de la masa con el perfil entero del suelo como el volumen de control.

Ecuación para el cálculo del flujo lateral:

$$s^2 - s^1 = \frac{i * L - q^1 + q^2}{(t^1 - t^2)^2}$$

Donde:

q: Flujo lateral en m³/h

S: Volumen drenable de agua almacenada en la zona de saturación en m/m

t: Tiempo en horas

i: Tasa de agua entrada en la zona de saturación en m²/h

L: Longitud de la pendiente de la cuenca en m

Los sufijos 1 y 2 se refieren al comienzo y al final del intervalo de tiempo respectivamente.

Percolación: es la fracción de agua infiltrada que logra atravesar la zona radicular, la cual SWAT considera entre (0-20 cm). En su cálculo el programa utiliza una técnica de almacenamiento combinado para predecir el flujo medio de cada capa del suelo.

Ecuación para el cálculo de la percolación:

$$O = SW(1 - \exp(-\Delta t / Tti))$$

$$Tti = (Swi - Fci) / Hi$$

Donde:

O: Tasa de percolación en mm/d

SW y Swi: Los componentes del agua del suelo al comienzo y al final del día en mm.

Δt : Intervalo de tiempo en 24 horas

Tti: Tiempo de viaje a través de la capa del suelo i en h

Hi: Conductividad hidráulica en mm/h

Fci: Contenido de agua a capacidad de campo para cada capa, en mm.

Flujo de retorno: es el agua que llega hasta el cauce de los canales naturales desde las aguas subterráneas, este flujo es el que mantiene agua en los ríos y quebradas en las épocas de baja precipitación (Neitsch y Diluzio, 1999). Además de las aguas superficiales existen aguas subterráneas, debido a la permeabilidad de los suelos y demás materiales, las aguas se infiltran por gravitación a través de poros, fisuras y grietas hasta alcanzar estratos impermeables, formando entonces las denominadas capas freáticas.

Las capas freáticas se encuentran a una distancia variable definida desde la superficie, pues después de cierta profundidad las rocas por la enorme presión no presentan ninguna grieta ni cavidades, este límite máximo del que las aguas no pasan, se ha calculado en unos 10000 a 12000 m (TARBUCK et al., 2001).

La ecuación usada para su cálculo está sustentada en que la variación del flujo de retorno con el tiempo está también relacionada linealmente con la recarga del acuífero.

Ecuación para el cálculo del flujo de retorno:

$$q = (q_i - 1)e^{-\delta\Delta t + R_c(1-\delta\Delta t)}$$

Donde:

qi: Flujo de retorno en el día

δ: Constante de proporcionalidad

Rc: Recarga del acuífero superficial

Δt: Intervalo de tiempo en 24 horas

Evapotranspiración: es el agua que sale del suelo hacia la atmósfera por transpiración de las plantas y por evaporación del agua en el suelo, la evapotranspiración es la suma de la transpiración y la evaporación. La transpiración es el movimiento del agua desde y a través de las células de las plantas vivas, la mayor parte de la transpiración está representada por el vapor de agua que pasa a través de las estomas de las hojas. La evaporación es el movimiento del agua desde áreas superficiales hacia la atmósfera sin pasar a través de las células de los seres vivos. Del agua que toman las plantas 98-99% se va por transpiración, y del 1-2% se utiliza en construcción de tejidos (Holdridge, 1987). En SWAT la evapotranspiración potencial es calculada a través varios métodos. El escogido en este estudio fue el de Hargreaves, establecido en 1985. Este estima la evapotranspiración potencial como una función de la radiación y la temperatura del aire. “La evapotranspiración potencial es la cantidad teórica de agua, que podría ser cedida a la atmósfera por la cobertura vegetal y el suelo en un clima dado” (Holdridge, 1987).

Ecuación para el cálculo de la evapotranspiración:

$$Et = 0.0032(RAMX / HV)(T + 17.8)(T_{\max} - T_{\min})^{0.6}$$

$$HV = 2.5 - 0.0022T$$

Donde:

RAMX: Radiación solar máxima posible en la superficie del suelo

HV: Calor latente de vaporización

T: Temperatura media diaria del aire

Tmax: Temperatura máxima en °C

Tmin: Temperatura mínima en °C.

A continuación, se provee la figura 3, en la cual se esquematizan los componentes del balance hídricos desde la óptica de metodología de SWAT, y también como se enruta el agua que ha sido captada en forma de precipitación (Precipitation), pérdidas del sistema por evaporación (Evaporation) y transpiración (Transpiration). Asimismo, se ilustra el movimiento

lateral en la superficie hasta el cauce o canal en forma de escorrentía (Surface Runoff), y el movimiento a través de la zona radical (Root Zone) hacia el cauce en forma de flujo lateral (Lateral Flow). También se ilustra el movimiento vertical en ambos sentidos desde y hacia los acuíferos: la zona no saturada o vadosa (Vadose Zone), la percolación hacia los acuíferos superficiales (Shallow Aquifer), y la recarga del canal por el flujo de retorno. Finalmente, se tiene también el movimiento hacia la capa confinada (Confining Layer) y los acuíferos profundos o confinados (Deep Aquifer).

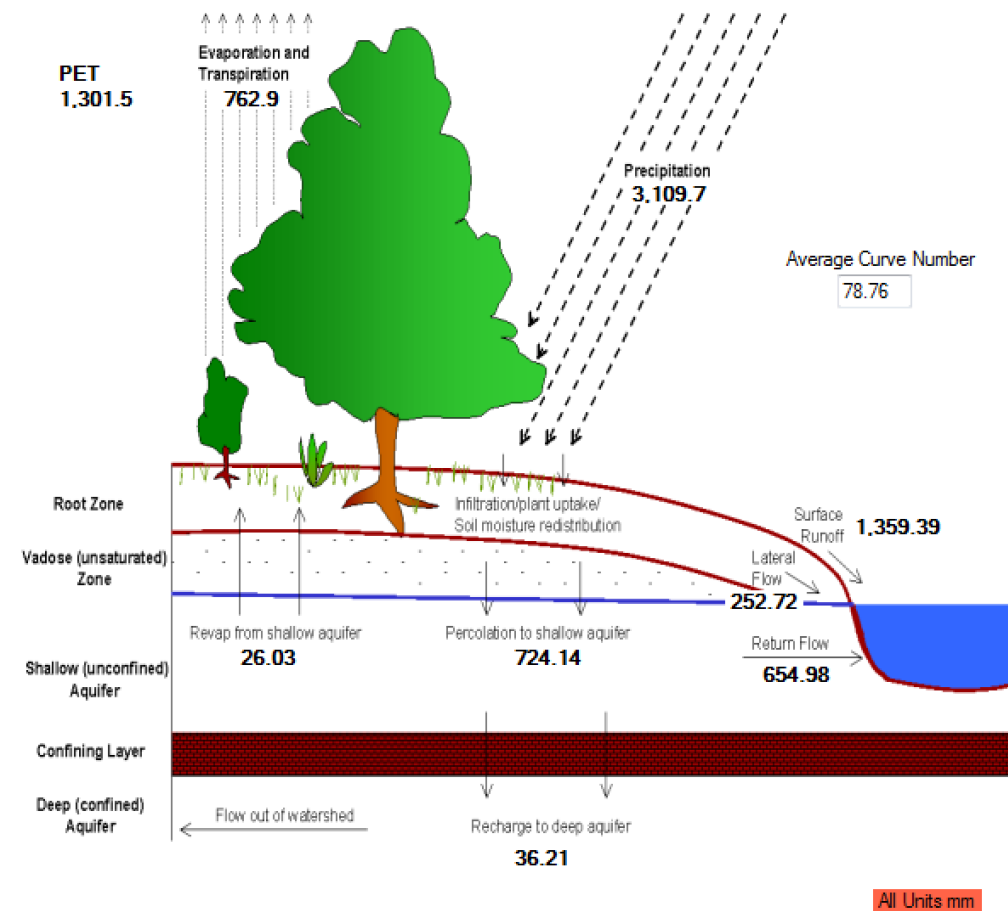


Figura. 3. Descripción gráfica de los principales componentes del balance de agua

1.2.3 Insumos utilizados y procesamiento

Nota: todos los insumos preparados y utilizados durante los análisis tienen una resolución espacial de 30 metros – cada pixel representa 0.09 hectáreas del paisaje.

Modelo digital de elevación MDE:

El MDE es utilizado para la segmentación del terreno en unidades hidrológicas de drenaje. Constituye una superficie de respuesta continua que representa los cambios o variaciones de la topografía en la cuenca. En este estudio se utilizaron datos procedientes del Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)⁴ obtenidos directamente desde el clearinghouse Earth Explorer⁵ del Servicio Geológico de los Estados Unidos.

Cobertura / Uso de la tierra:

En este caso se utilizó un producto geoespacial que tuviera cubrimiento completo del contexto espacial de Honduras. La fuente de datos usada procede del Mapa Forestal y de cobertura de la tierra⁶ elaborado en 2014 por el ICF con apoyo del programa REDDS-GIZ-CCAD. Imágenes de alta resolución espacial fueron utilizados para tener unidades de mapeo mínimas de 0.5 hectáreas. Este mismo mapa fue sobreposicionado espacialmente con la máscara de ataques de gorgojo para tener los dos escenarios de cobertura / uso: pre-ataques y post-ataques del gorgojo barrenador. SWAT requiere de una serie de coeficientes para simular el efecto del uso de la tierra en los componentes de evapotranspiración e infiltración. El modelo dispone de una base de datos compleja para distintos tipos de uso y cobertura. Mediante revisión de literatura y de la leyenda que acompaña al mapa forestal 2014 se definió una re-codificación de los usos del mapa 2014 en clases de uso que pueden ser utilizadas por SWAT.

Suelos y su capacidad hidrológica

Existen diversas fuentes de datos para clasificar los suelos en Honduras. Una de ellas es el mapa preparado por Simmons (de Honduras, 1969) a la escala 1.000.000. No obstante, este mapa tiene una representación espacial demasiado generalizada por la escala tan pequeña la cual no es aplicable para el tamaño de las subcuencas siendo consideradas en este estudio. Asimismo, resalta la ausencia de información a nivel de horizonte; misma que es requerida en SWAT. En este contexto, se trabajó con la base nacional de suelos preparada por la Dirección Ejecutiva de Catastro DEC que es producto de la recopilación de distintos estudios. Esta fuente de datos tiene

⁴ <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>

⁵ <http://earthexplorer.usgs.gov/>

⁶ http://www.reddccadgiz.org/documentos/doc_1697518440.pdf

información puntual obtenida de calicatas y desagregada a nivel de horizonte del suelo. Para su utilización en SWAT es fundamental obtener datos de parámetros como apreciación textural, estructura, dimensión de horizontes y contenido de carbono. Esta información fue recabada en campo y esta disponible en la base de suelos de la DEC. Así, las poligonales sin atributos fueron editadas para coincidir con la ubicación de las calicatas, de tal forma que cada polígono pudiera tener asociada la información (estructural, textural, físico, química) de cada punto y fuera aplicable al paisaje. Ver siguiente figura.

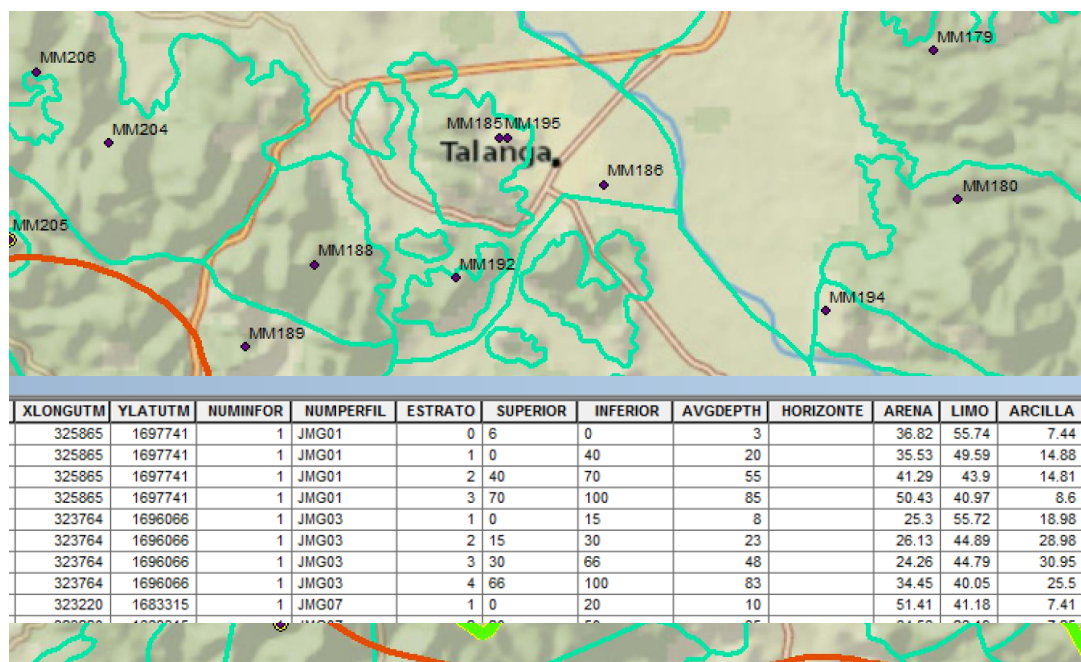


Fig. 4. Unidades de muestreo de suelos según base de datos de la DEC y base de atributos de las calicatas de suelo asociadas a las poligonales

La compilación de estos datos para su uso en SWAT es una de las fases que requiere mucha interacción manual pero el esfuerzo es meritorio ya que redunda en mejores simulaciones de la hidrología local. En este contexto, se utilizó la extensión Perfil de Suelos desarrollada por la sección de análisis de cuencas del Centro Internacional de Agricultura Tropical CIAT. Esta interfase es funcional con versiones del software Arcview para estaciones de 64 bits. Además de calcular los parámetros requeridos por SWAT los envía a un archivo de tipo *.dbf con el arreglo necesario para ser utilizado en el modelo.

Base de datos meteorológica:

Los requerimientos del SWAT en este sentido son numerosos. En este contexto, se considera que al menos se puedan obtener registros de las siguientes variables climáticas, requiriéndose un mínimo de 5 años de registros para cada estación a ser utilizada.

- Precipitación diaria
- Temperatura mínima y máxima diaria
- Radiación solar
- Velocidad del viento
- Humedad Relativa

Los datos climáticos usados para este estudio fueron obtenidos del sitio para datos globales climáticos⁷ que están asociados con el formato requerido por SWAT.

1.2.4 Procesos principales y salidas en el uso del modelo

A continuación, se da una breve descripción de los procesos ejecutados y las salidas del modelo.

Delimitación de subcuencas:

Usando el MDE se definen umbrales de superficie en hectáreas para definir el grado de detalle de las subcuencas. En este estudio se utilizaron distintos umbrales de superficie, pero el criterio principal fue que la delimitación del área de drenaje coincidiera con los límites de las subcuencas del balance hídrico (Balairón Pérez et al., 2003). Este proceso incluye también la definición de “outlets” o puntos de aforo de toda la cuenca y subcuencas discriminadas.

Unidades de respuesta hidrológica URH:

Son combinaciones únicas de tipos de uso de la tierra y clases de suelo, ya que el comportamiento hidrológico será muy diferente en cada combinación. El régimen hidrológico en SWAT es simulada para cada una de estas entidades URH, y luego es sumariado a nivel de cuenca para la fase terrestre y a nivel del cauce para la fase hídrica. El modelo proporciona la opción de redefinir que usos o suelos por su baja proporción de superficie no sean tomados en cuenta (Ej. Usos o suelos con cobertura menor que 4%). En este caso se definieron umbrales de

⁷ <http://globalweather.tamu.edu/>

5% para tener un modelo más simplificado y al mismo tiempo eficiente. En este contexto y definidas las clases de uso US , y las series de suelo SS , la superposición espacial de ambas ($US_i + SS_j$) generó una matriz con dimensiones $i = 1, 2, 3, \dots, I$ filas y $j = 1, 2, 3, \dots, J$ columnas, compuestas por $m = I \times J$ posibles combinaciones de URH. SWAT asocia los atributos de cada combinación con su correspondencia de subcuencas para todos los cálculos posteriores.

1.2.5 Procesamiento de la simulación:

Cuando se han completado los procesos anteriores, se puede iniciar la operación de simulación. Una interfase permite al usuario la selección de los siguientes puntos:

- Fecha de inicio y término de la simulación
- Método de evapotranspiración
- Método para el cálculo de oferta hídrica
- Número de años para que el modelo se autocalibre (warm up)
- Frecuencia de la salida

Para efectos de este estudio, se definió como inicio el primero de Enero del año 2000 y como inicio el final de Julio 2014. Este rango de fechas se ajusta a la disponibilidad de datos en la base meteorológica. Se definió cinco años para auto-calibración, por lo tanto, las salidas de las simulaciones comprenden el período desde Enero del año 2005 hasta final del Julio de 2014. Las frecuencias de salida pueden ser diarias, mensuales o anuales, en este caso se definió obtener un régimen mensual.

1.3 Resultados en SWAT

El SWAT genera una gran cantidad de datos de salida en múltiples tablas que describen el comportamiento de la cuenca en general, de las subcuencas, del cauce, calidad de agua, etc. Para fines de esta asignación se utilizaron los datos de la tabla RCH. Esta tabla describe lo que ocurre en el canal (REACH). El siguiente cuadro tiene detalle de algunas de las variables que contiene la tabla RCH y que son de utilidad en esta asignación.

Cuadro 1. Tipo de resultados a considerar del SWAT.

Salida analizada	Referencia	Variable	Unidades
RCH	Comportamiento de los canales de drenaje o ríos de las subcuencas	<ul style="list-style-type: none"> • Agua que sale de la sección del canal • Sedimentos que salen de la sección del canal • Concentración de sedimentos en la sección del canal 	$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ TM mg Kg

1.3.1 Obtención de un indicador de disminución en la producción de agua como efecto de los ataques del gorgojo en bosque de coníferas

Como salida fundamental de esta parte del estudio en SWAT y que sirva de apoyo al componente de planificación económica se generó un indicador único que resume el efecto de los ataques de gorgojo en una determinada cuenca. Este indicador es la cuantificación del volumen de agua (m^3) que se pierde de generar por unidad de área (ha) impactada por el gorgojo durante los meses de estiaje en los que el balance hídrico al año 2025 supone un déficit. Para este efecto, se obtuvieron los promedios mensuales de caudal generados por SWAT ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) para los 10 años considerados (2005-2014) por separado para cada escenario: (a) Sin plagas - cobertura de la tierra 2014 previo a los ataques -, y (b) con plagas, en las que los brotes activos e inactivos fueron incluidos en el mapa forestal 2014. Estos caudales promedios fueron convertidos a volúmenes totales por mes (m^3). Posteriormente, para aquellos meses en los que el balance hídrico indicaba un déficit, se encontró la diferencia entre escenarios (Sin Plagas – Con Plagas), y se obtuvo la suma de estos meses. Esta suma total fue dividida entre el área identificada como brotes de gorgojo a nivel de cada cuenca analizada en SWAT. De esta forma se obtiene el indicador – m^3 de agua perdida por hectárea de bosque de conífera afectada por el gorgojo.

1.3.2 Áreas simuladas en SWAT

Tres subcuencas donde intervendrá el programa distribuidas en las tres cuencas de primer orden consideradas (Ulúa, Choluteca, y Patuca) fueron simuladas en SWAT. Estas subcuencas

representan distintas zonas ecológicas dentro del macizo central de coníferas del país. En la siguiente figura se muestra su distribución espacial.

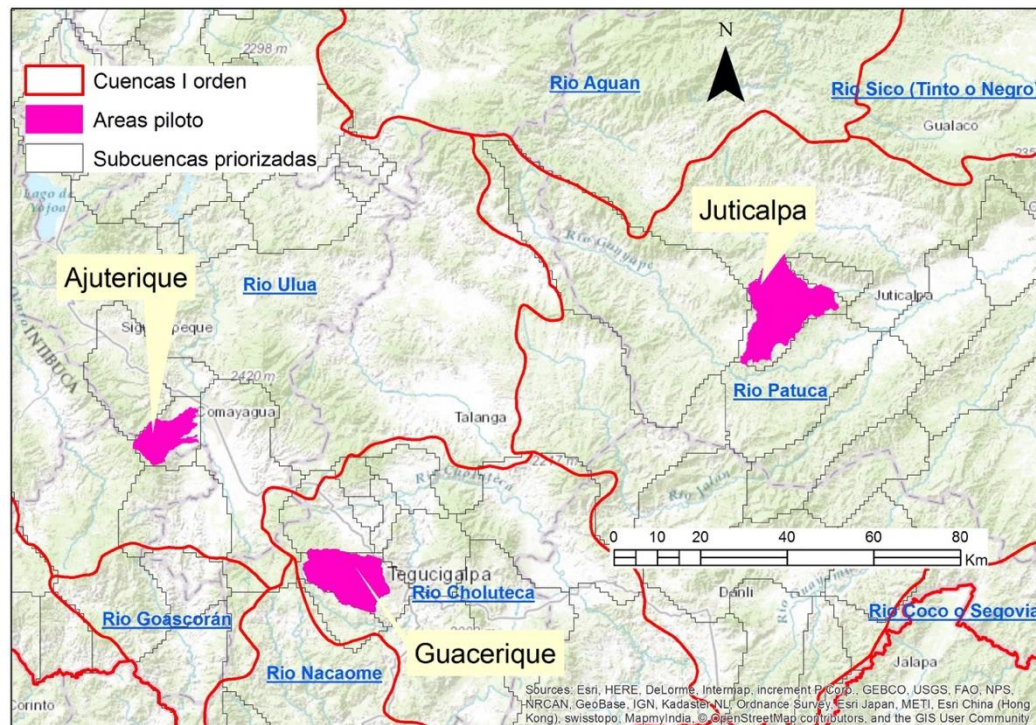


Fig. 5. Distribución espacial de las unidades de drenaje piloto simuladas con SWAT en el contexto de las subcuencas priorizadas

Cabe anotar que estas tres subcuencas forman parte del conjunto de subcuencas que fueron determinadas como prioritarias durante otra fase del estudio de desarrollo del perfil del proyecto. En otras palabras, este estudio de implementación de SWAT utilizó datos y cuencas enmarcadas en el contexto espacial de aquellas subcuencas denominadas como prioritarias para la implementación del proyecto en la forma de incentivos para la restauración de las zonas degradadas.

1.3.3 Impacto del cambio de cobertura en las zonas plagadas: Volumen perdido por unidad de área

En el siguiente cuadro y de manera abreviada, se presentan los principales indicadores para las subcuencas pilotos simuladas.

Cuadro 2. Indicadores para las cuencas piloto simuladas en SWAT.

Área piloto	Superficie total (ha) – simulada en SWAT	Superficie de bosque coníferas (ha) – mapa forestal 2014	Superficie afectada por brotes de gorgojo (ha)	% Pérdida bosque	Meses de déficit hídrico al 2020 según balance (demanda supera oferta)	Volumen (m3) en la época de déficit sin considerar impacto gorgojo	Volumen (m3) en la época de déficit considerando el impacto gorgojo	Volumen total de agua perdido por los ataques de gorgojo (m ³) durante los meses de estiaje con déficit	% Pérdida de volumen	Volumen perdido por unidad de área en la cuenca (m ³ ha ⁻¹)
Guacerique	19,024.02	4,904.28	1,062.63	22%	Enero, Febrero, Marzo, Abril	14,113,258	13,982,440	130,818	0.93%	123.11
Juticalpa	27,552.96	7,042.50	781.20	11%	Diciembre, Enero, Febrero, Marzo, Abril, Mayo	11,060,750	10,892,780	167,969	1.52%	215.05
Ajuterique	10,526.49	379.53	24.84	7%	Diciembre, Enero, Febrero, Marzo, Abril, Mayo	2,883,529	2,878,803	4,726	0.16%	190.27

En este contexto, el valor promedio ponderado ((volumen perdido / hectárea por superficie afectada por el gorgojo) dividido entre área total afectada) de afectación en el servicio de producción de agua por causa del ataque de gorgojo se estima en 162 m³/ha.

1.3.4 Recuperación del volumen perdido vía implementación del proyecto

La restauración de las áreas dañadas por los ataques de gorgojo en la zona de interés incluye la planificación y ejecución de actividades silviculturales (ej. reforestación, protección de regeneración natural, manejo de densidades, etc.) con fines multipropósito. Entre estos fines, se considera primordial la devolución de la capacidad de regulación hidrológica que el bosque tiene sobre la producción de agua superficial, y que es la fuente primordial para abastecer las comunidades de la zona de intervención. Se considera que la redención de las capacidades hidrológicas se logrará mediante la reinstauración de las condiciones de cobertura forestal (dosel superior y sotobosque) existentes antes de la aparición de los brotes de plaga.

Así, se ha estimado (Navarro et al., 2016) una recuperación gradual del servicio ecosistémico de producción de agua que se describe como una función paralela al proceso de crecimiento de las masas boscosas. En la figura siguiente (6a) se describe el proceso – no lineal – de recuperación del volumen de agua perdido por los ataques de gorgojo, como una función del crecimiento del bosque instaurado durante las actividades silvícolas previstas. Se prevé que, con la implementación del proyecto, tomará aproximadamente 12 años recuperar las condiciones del ambiente físico (características de la vegetación en cuanto a densidad, estructura vertical, calidad del sotobosque) que propicien una regulación hidrológica del bosque tal cual logre incrementar un volumen equivalente a los 162 m³ / ha estimados como promedio ponderado de pérdida mediante las simulaciones realizadas con SWAT.

Por otra parte, la no ejecución del proyecto implica que potencialmente se darán condiciones de cobertura y uso del suelo que, aunque avalan cierta recuperación del ambiente físico, no garantizan una recuperación completa del volumen perdido. La simulación a 25 años desde la implementación del proyecto, nos indica que el máximo volumen que se puede esperar extra sin proyecto es de 140.1 m³/ha, lo cual efectivamente deja un diferencial negativo de disponibilidad de agua para las comunidades. En otras palabras, no ejecutar las actividades de restauración, implica que el volumen perdido no podrá ser recuperado aún después de un cuarto de siglo.

En esta misma línea (figura 6b) podemos visualizar que el incremento extra (diferencia entre volumen obtenido CON vs. SIN proyecto) tiene una pendiente máxima durante los primeros cinco (5) años. Este comportamiento se espera ya que una pronta ejecución de los incentivos a la restauración (ej. plantaciones o protección de regeneración), impactarán la configuración del paisaje, de tal forma que condiciones más favorables de intercepción, infiltración y escorrentía superficial estarán presentes en comparación con otros usos (ej. ganadería y agricultura extensiva) que potencialmente ocurrirán si no se implementa el proyecto. La pendiente de este volumen incremental tiende a estabilizarse hasta lograr un pináculo en el año 12. Durante este decenio se espera que cierta recuperación del bosque ocurra sin ejecución del proyecto, y por ende una recuperación de la capacidad de regulación se de cómo respuesta. Sin embargo, esta recuperación no es lo suficiente en magnitud para equiparar los resultados esperados con un proyecto de incentivos. Finalmente, después del año 12 la pendiente de este volumen incremental se hace negativa durante el resto de la simulación (13 años extra), y supone un descenso gradual de los beneficios del proyecto en comparación con no realizar actividades silvícolas. La dinámica de cambios de cobertura y usos de la tierra en Honduras, indican que después de ser explotadas de forma extensiva, estas tierras estarán sujetas a un proceso de abandono y barbecho que en la mayoría de los casos implicará una recuperación de la capacidad de regulación hidrológica. No obstante, sigue siendo evidente que este diferencial no se equipara con el volumen obtenido mediante los incentivos y actividades silviculturales.

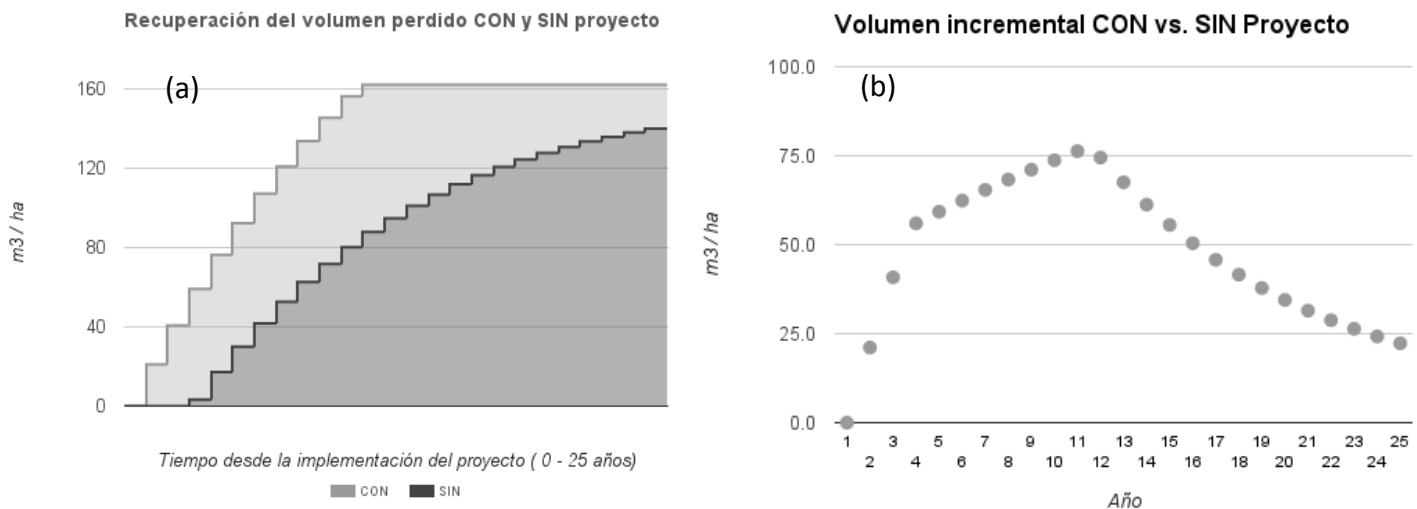


Fig. 6. Comportamiento temporal de la recuperación del volumen perdido como consecuencia de los ataques de gorgojo. (a) Volumen total a recuperar CON y SIN proyecto, (b) Volumen diferencial CON vs. SIN proyecto

1.4 Discusión

Se han simulado tres subcuencas que están enmarcadas dentro del contexto espacial de la zona identificada preliminarmente como prioritaria para intervenir en el proyecto. Tal y como era la expectativa inicial, se observaron reducciones en la producción de agua durante la época seca al simular un cambio en la cobertura de bosque de coníferas (escenario normal) y una combinación de pastos degradados y tierras sin cobertura (escenario con plagas). Lo anterior como resultado de las pérdidas de intercepción e infiltración por ausencia de foliaje del bosque, un aumento de la escorrentía superficial en la época lluviosa y un descenso del aporte al flujo base durante la época de estiaje. No se observó una respuesta lineal entre el porcentaje de bosque atacado y el porcentaje de agua perdido como respuesta de los ataques de gorgojo barrenador. Se debe recordar que la extensión, diversidad de la cobertura de la tierra, suelos, y distribución de la precipitación es distinta en las subcuencas simuladas, y por lo tanto un contexto diverso de respuestas era de esperarse.

Este análisis se enfocó en percibir la problemática creada en la producción de agua superficial durante los meses críticos del verano, y no en la totalidad del agua producida a nivel anual. Ha sido abundantemente reportado en la literatura (Stednick, 1996) que remociones de la cobertura forestal garantiza un excedente anual en la oferta hídrica anual promedio. Esto puede ser una ventaja en aquellas cuencas en las que existe infraestructura de almacenamiento de los caudales en excedencia durante la temporada lluviosa. Sin embargo, esto no es una característica promedio en las zonas que se espera intervenir, en donde se carece de reservorios y el acceso al agua superficial durante todo el año es importante para mantener los sistemas de producción y provisión de agua a las comunidades.

Más importante que los aumentos o decrecimientos de la oferta hídrica es la consideración del régimen estacional de los flujos superficiales, especialmente en la época seca. Si las oportunidades de infiltración después de la deforestación han decaído a un extremo que el incremento del agua que deja el área de captación como escorrentía excede el aumento en la recarga de agua subterránea asociada con la transpiración reducida, entonces una disminución del flujo superficial de la época seca resultará (Bruijnzeel, 1989; Sandström, 1998). (Brooks et al., 2012) exponen la relevancia de que aunque la deforestación incide por lo general en un aumento de la producción de agua, se debe ser cuidadoso en la respuesta cuantitativa temporal de los flujos. A este respecto exponen varios puntos: (1) la remoción del bosque o su cambio por

plantas con pérdidas anuales bajas de transpiración e intercepción puede incrementar la magnitud de los picos de caudal o volúmenes muy altos en cortos períodos; (2) las actividades que reducen la capacidad de infiltración de los suelos, como el pastoreo intensivo, construcción de caminos y el aprovechamiento forestal pueden aumentar la escorrentía; por ende el flujo de las corrientes responde mucho más rápidamente a los eventos de precipitación en forma de picos de descarga más altos en menos tiempo; y (3) las intervenciones antropogénicas descritas anteriormente, al romper el balance hídrico, inciden además en que el volumen de agua durante los períodos de estiaje (verano), sea más bajo que el encontrado en zonas forestadas.

La recuperación de la capacidad reguladora de los procesos hidrológicos que ejerce el bosque es sumamente importante, y desempeñará un papel protagónico en las zonas de estudio, y en la zona de intervención del proyecto BID. Según las proyecciones (Navarro et al., 2016), con una pronta ejecución del proyecto, el volumen que ha sido simulado como perdida a causa de los ataques del gorgojo, se puede recuperar en un espacio de 12 años. Esto es posible si las prescripciones silvícolas aseguran la recuperación de las condiciones de dosel y sotobosque existente previo a los ataques. No realizar ningún tipo de manejo para la restauración indica que aún después de 25 años, el volumen de agua superficial que se perdió como resultado de los brotes de gorgojo, no podrá ser recuperado, impactando indudablemente las condiciones de vida de las comunidades insertas en el área del proyecto.

1.5 Referencias

- Balairón Pérez, L., Álvarez Rodríguez, J., Borrell Brito, E., Delgado Sánchez, M., 2003. Balance hídrico en Honduras. Ing. Civ. 49–61.
- Brooks, K.N., Ffolliott, P.F., Magner, J.A., 2012. Hydrology and the Management of Watersheds. John Wiley & Sons.
- Bruijnzeel, L.A., 1989. forestation and dry season flow in the tropics: A closer look. J. Trop. For. Sci. 229–243.
- de Honduras, F.L.S., 1969. Informe al Gobierno de Honduras. Roma Ital.
- Dile, Y.T., Daggupati, P., George, C., Srinivasan, R., Arnold, J., 2016. Introducing a new open source GIS user interface for the SWAT model. Environ. Model. Softw. 85, 129–138.
- Holdridge, L.R., 1987. Ecología basada en zonas de vida. Agroamérica.
- Navarro, G., Louman, B., Valera, V., 2016. DISEÑO DEL COMPONENTE 1 Y EVALUACIÓN ECONÓMICA EXANTE DE LA OPERACIÓN HO-L1179. InterAmerican Development Bank IADB, Tegucigalpa, Honduras.
- Neitsch, S.L., Williams, J.R., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., 2011. Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2009. Texas Water Resources Institute.
- Sandström, K., 1998. Can forests provide water: widespread myth or scientific reality? Ambio Swed.

- Stednick, J.D., 1996. Monitoring the effects of timber harvest on annual water yield. *J. Hydrol.* 176, 79–95.
- TARBUCK, E., LUTGENS, Y., de la Tierra, F.C., 2001. Una introducción a la Geología Física. Sexta Edición. Illinois Central College. Prentice Hall. New York.
- Winchell, M., Srinivasan, R., Di Luzio, M., Arnold, J., 2007. ArcSWAT interface for SWAT2005 User's guide. Tex. Agric. Exp. Stn. U. S. Dep. Agric. Temple TX.