

CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL
DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA

DIVISIÓN DE EDUCACIÓN
PROGRAMA DE POSGRADO

Análisis del comportamiento hidrológico de obras de cosecha de agua por escorrentía superficial de tipo reservorio, sobre la microcuenca Quebrada Sucia, corredor seco de Nicaragua

Tesis sometida a consideración de la División de Educación y el Programa de Posgrado como requisito para optar al grado de

MAGISTER SCIENTIAE

Maestría Académica en Manejo y Gestión Integral de Cuencas Hidrográficas

Adania Yosari Matus Reyes

Turrialba, Costa Rica

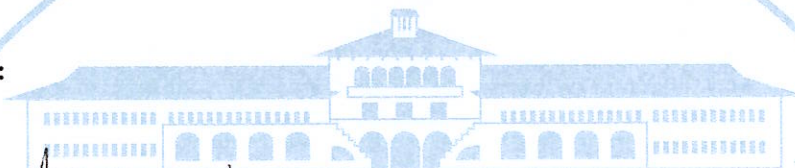
2023

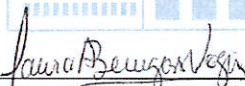
Esta tesis ha sido aceptada en su presente forma por la División de Educación y la Escuela de Posgrado del CATIE y aprobada por el Comité Consejero de la estudiante, como requisito parcial para optar por el grado de

División de Educación

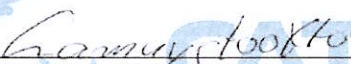
**MAGISTER SCIENTIAE EN MANEJO Y GESTIÓN INTEGRAL
DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS**

FIRMANTES:

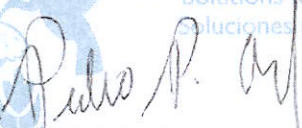





Laura Benegas Negri, Ph.D.
Codirectora de tesis



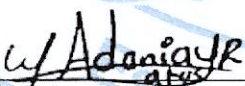
Ney Ríos Ramírez, M.Sc.
Codirector de tesis



Pedro Pablo Orozco Bucardo, M.Sc.
Miembro Comité Consejero



Mariela Leandro Muñoz, Ph.D.
Decana, a.i. Escuela de Posgrado



Adania Yosari Matus Reyes
Candidata

Agradecimientos

A Dios por darme las fuerzas contantes, por su amor inmerecido y por qué hasta este momento no me ha desamparado.

A mi amada madre, María Isabel Reyes. Mamá, tu amor, dedicación y sacrificio han sido la base de todo lo que he logrado hasta ahora. Tú has sido mi mayor inspiración. Tus palabras de aliento y tu fe infinita en mí me han dado la confianza necesaria para perseguir mis sueños y trabajar arduamente para alcanzar mis metas.

A mi querida abuela, Rosario Pérez, quiero expresar mi gratitud eterna. Tus sabios consejos, tu generosidad y tus valiosas enseñanzas han sido una guía constante en mi vida. Tú me has mostrado el verdadero significado de la perseverancia y me has recordado la importancia de mantenerme fiel a mis valores.

A mi amada familia de Andino, ustedes han sido mi fuente de alegría y apoyo constante. Cada uno de ustedes ha aportado algo especial a mi vida. Gracias por estar a mi lado en cada paso del camino, celebrando mis triunfos y brindándome consuelo en los momentos de adversidad. No podría haber pedido una familia mejor.

A mis directores de tesis Ney Ríos y Laura Benegas y comité, su orientación y experiencia han sido invaluable en mi desarrollo académico. Gracias por su dedicación y por compartir su sabiduría conmigo. Su apoyo y comentarios constructivos han sido fundamentales para el éxito de mi investigación. Su compromiso con mi crecimiento y aprendizaje ha sido inspirador, y estoy verdaderamente agradecido por su guía a lo largo de este proceso.

Al proyecto cosecha de agua por todo el apoyo económico que me ha concedido.

Contenido

1.Introducción	1
2. Metodología	3
2.1. Ubicación y descripción del área de estudio	3
2.2 Diseño y construcción de la metodología	4
2.2.1 Descripción del modelo hidrológico empleado para la cuantificación del balance hídrico.....	4
2.2.2. Simulación de balance hídrico	5
2.3 Configuración de los datos de entrada	6
2.3.1 Topografía	6
2.3.2 Variables de suelo y clima.....	7
2.3.3 Variables climáticas	12
2.4 Simulación base del balance hídrico en la microcuenca	14
2.5 Muestreo de conductividad hidráulica saturada de campo (Kfs) en obras de cosecha de agua por escorrentía (OCAS) de tipo reservorio, en campo.....	14
2.6 Diseño de escenarios de incremento de obras de cosecha de agua por escorrentía de tipo reservorio	15
2.6.1 Agregación de obras al modelo de la SWAT	17
3. Resultados	19
3.1 Morfometría de la microcuenca	19
2.2.1Perímetro y ancho de la microcuenca.....	19
3.2.2 Longitud y pendiente del cauce principal.....	19
3.2.3 Elevaciones.....	19
3.2.4 Desnivel altitudinal.....	19
3.2.5 Índice de compacidad (Kc).....	19
3.2.6 El factor de forma (Ff).....	20
3.2.7 Densidad de drenaje	20
3.2.8 Jerarquía de la red fluvial (orden de corrientes).....	20
3.2.9 Perfil altimétrico del cauce	20
3.2.10 Curva hipsométrica.....	21
3.2 Simulación base de balance hídrico a nivel de cuenca sin la intervención de obras de cosecha de agua por escorrentía de tipo reservorio.....	22
.3 Comportamiento de variables hidrológicas a partir de escenarios de balance hídrico sobre la microcuenca Quebrada Sucia.....	22

3.3.1 Comportamiento hidrológico del agua subterránea.....	23
3.3.3 Comportamiento hidrológico de la percolación	25
4. Discusión	26
5. Conclusión	27
7. Referencias bibliográficas	29

Listado de Cuadros

Cuadro 1 Categorías de uso de suelo – equivalencia (LUC por sus siglas en inglés) – SWAT... 8	
Cuadro 2 Textura del suelo, microcuenca Quebrada Sucia.....	10
Cuadro 3 Parámetros de datos para (usersoil por sus siglas en inglés) del modelo SWAT	11
Cuadro 4 Configuraciones de tiempo de remojo y sistema de presión, infiltrómetro SATURO	15
Cuadro 5 Principales insumos para la aplicación de la herramienta geoespacial cosecha H ₂ O .	16
Cuadro 6 Parametrización de las obras de cosecha de agua por escorrentía, implementados en el modelo SWAT	18
Cuadro 7 Resumen de parámetros morfométricos de la microcuenca Quebrada Sucia	19

Listado de Figuras

Figura 1. Sistema de cosecha de agua de escorrentía tipo reservorio con sus componentes: infraestructura o reservorio, área de uso-aprovechamiento del agua (cultivo agrícola) y área de captación-recolección o de recarga hídrica. Proyecto cosecha de agua (2020).....	1
Figura 2 Ubicación geográfica de la microcuenca Quebrada Sucia, Somoto, Nicaragua, 2023 ..	3
Figura 3. Esquema-resumen del procesamiento modelo de la SWAT..	4
Figura 4. Unidades de respuesta hidrológica en la microcuenca Quebrada Sucia.	5
Figura 5 Comparativo de la delimitación inicial y ajuste generado utilizando SWAT en la microcuenca Quebrada Sucia	7
Figura 6 Uso y cobertura del suelo según categorías equivalentes de la SWAT	8
Figura 7 Clasificación de los suelos, microcuenca Quebrada Sucia.	9
Figura 8. Esquema de procesamiento y construcción de la data de suelos para la SWAT.....	10
Figura 9 Estaciones meteorológicas globales de precipitación y temperatura, microcuenca Quebrada Sucia.....	12
Figura 10. Climograma referencial. Estos son datos promedios mensuales del periodo 2001-2019 calculados a partir de la información de la estación climática 1	13
Figura 11 . Ubicación de obras de cosecha de agua por escorrentía de tipo reservorio OCAS para muestreo de conductividad hidráulica saturada en campo (Kfs).....	14
Figura 12. Regionalización de zonas potenciales para la identificación de nuevos sitios potenciales para obras de cosecha de agua (OCAS). Ríos y Benegas (2022).	16
Figura 13. Diagrama resumen de métodos aplicados en la implementación de escenarios de incrementos de obras de cosecha de agua agregados a SWAT	17
Figura 14. Perfil altimétrico del cauce principal de la microcuenca Quebrada Sucia, Nicaragua, 2023	20

Figura 15. Curva hipsométrica de la microcuenca Quebrada Sucia, Nicaragua, 2023.....	21
Figura 16. Representación de balance hídrico en la microcuenca Quebrada Sucia..	22
Figura 17 Comparación de los escenarios hidrológicos que exploran el comportamiento espacial del agua subterránea según el grado de intervención de las obras de cosecha de agua (OCAS) en la microcuenca Quebrada Sucia.....	23
Figura 18 Comparación de los escenarios hidrológicos que exploran el comportamiento espacial del contenido de agua en el suelo según el grado de intervención de las obras de cosecha de agua (OCAS) en la microcuenca Quebrada Sucia..	24
Figura 19 Comparación de los escenarios hidrológicos que exploran el comportamiento espacial de la percolación según el grado de intervención de las obras de cosecha de agua (OCAS) en la microcuenca Quebrada Sucia..	25

Acrónimos y abreviaturas

CATIE	Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza
COSUDE	Cooperación Suiza en América Central ¹
CSN	Corredor Seco Nicaragüense
CSC	Corredor Seco Centroamericano
Dd	Densidad de Drenaje
DEM	Modelo de Elevación Digital ¹
ENOS	El Niño-Oscilación del Sur
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura ¹
GWP	Asociación Mundial del Agua ¹
HURs	Unidades de respuesta hidrológica ¹
Kc	Índice de Compacidad
INETER	Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales
NYSKIP	Número de Años para no Imprimir Resultados ¹
NASA	Administración Espacial de Aeronáutica y el Espacio ¹
OCAS	Obras de Cosecha de agua por Escorrentía
SbN	Soluciones Basadas en la Naturaleza
SWAT	Herramienta para la Evaluación del Suelo y Agua ¹
SATURRO	Conductividad Hidráulica Saturada del Suelo en Campo ¹

¹ por sus siglas en inglés

Análisis del comportamiento hidrológico de obras de cosecha de agua por escorrentía superficial de tipo reservorio, sobre la microcuenca Quebrada Sucia, corredor seco de Nicaragua

Adania Matus (adania.matus@catie.ac.cr)
Laura Benegas (laura.benegas@catie.ac.cr)
Ney Ríos (ney.rios@catie.ac.cr)
Pedro Orozco (pedro.orozco@catie.ac.cr)

Resumen

En regiones con escasez de agua, la sequía tiene un impacto significativo al reducir la disponibilidad del recurso hasta un 30 % a 40 %. Los periodos prolongados de falta de lluvia acarrearán consecuencias adversas para los cultivos de granos básicos, los cuales conforman una de las principales fuentes de subsistencia en la región.

El presente estudio se realizó en la microcuenca Quebrada Sucia, que pertenece a la subcuenca del Río Inalí, específicamente en los municipios de San Lucas y Somoto, del departamento de Madriz en Nicaragua y se localizan en la región norte del área del corredor seco de Nicaragua.

El objetivo de este estudio fue analizar el comportamiento de las variables hidrológicas (agua subterránea, humedad del suelo, percolación) que describen el balance hídrico en la microcuenca, mediante la implementación de diferentes escenarios de incremento en la construcción de obras de cosecha de agua.

El análisis tiene un enfoque exploratorio. Para llevarlo a cabo, se utilizó un diseño de muestreo no probabilístico por conveniencia, elaborado a partir del análisis de información geoespacial secundaria. Se utilizó la Herramienta para la Evaluación del Suelo y Agua (SWAT). Los escenarios evaluados fueron los siguientes: el escenario 1 consistió en la integración de las obras de cosecha de agua actualmente construidas por el Proyecto Cosecha de Agua a SWAT; el escenario 2 se basó en un incremento del 25 % en la construcción de nuevas obras, utilizando la identificación de sitios potenciales; y el escenario 3 incluyó un incremento del 50 %, el cual demostró una contribución significativamente mayor de agua subterránea en la microcuenca, con un aumento de hasta un 22 % en comparación con escenarios previos.

Estos resultados sugieren que aumentar la cantidad de obras de cosecha de agua implica un impacto positivo en la recarga de los acuíferos y, por ende, en la disponibilidad de agua a largo plazo. Por lo tanto, se destaca la importancia de implementar y mantener obras de cosecha de agua en áreas similares a la microcuenca estudiada, como una estrategia clave para garantizar una gestión sostenible del agua.

Palabras claves: SWAT, Escenarios de Incremento, Obras de Cosecha de Agua, Agua Subterránea, Humedad del Suelo, Percolación.

Analysis of the hydrological behavior of water harvesting systems by surface runoff of reservoir type, on the Quebrada Sucia micro-basin, Corredor Seco of Nicaragua

Adania Matus (adania.matus@catie.ac.cr)

Laura Benegas (laura.benegas@catie.ac.cr)

Ney Ríos (ney.rios@catie.ac.cr)

Pedro Orozco (pedro.orozco@catie.ac.cr)

Abstract

In regions with water scarcity, drought has a significant impact, reducing water availability by up to 30 %-40 %. These prolonged periods of rainfall shortage have adverse consequences for staple grain crops, which are one of the main sources of subsistence in the region.

The study was conducted in the Quebrada Sucia micro-watershed, which belongs to the Inalí River sub-basin, specifically in the municipalities of San Lucas and Somoto, in the department of Madriz, Nicaragua, located in the northern region of Nicaragua's dry corridor area.

The objective of this study was to analyze the behavior of hydrological variables (groundwater, soil moisture, percolation) that describe the water balance in the micro-watershed through the implementation of different scenarios involving increased construction of water harvesting structures.

This study has an exploratory approach. A convenience non-probabilistic sampling design was used, developed based on the analysis of secondary geospatial information. The Soil and Water Assessment Tool (SWAT) was used. The evaluated scenarios were as follows: scenario 1 consisted of integrating the currently constructed water harvesting structures by the water harvesting project into SWAT; scenario 2 was based on a 25 % increase in the construction of new structures, using the identification of potential sites; and scenario 3 included a 50 % increase, which demonstrated a significantly higher contribution of groundwater in the micro-watershed, with an increase of up to 22 % compared to previous scenarios.

These results suggest that increasing the number of water harvesting structures has a positive impact on aquifer recharge and, therefore, long-term water availability. Therefore, the importance of implementing and maintaining water harvesting structures in similar areas to the studied micro-watershed is emphasized as a key strategy to ensure sustainable water management.

Keywords: SWAT, Increment Scenarios, Water Harvesting Structures, Groundwater, Soil Moisture, Percolation.

1.Introducción

La gestión del agua se está convirtiendo en el principal desafío de la humanidad en el siglo XXI, debido a los pronósticos de disponibilidad de agua a largo plazo. Este panorama supone retos para los administradores de recursos en todo el mundo y porque las proyecciones prevén estaciones climáticas más secas y un aumento en la reducción del agua (Barnett y Pierce 2009; Kundzewicz *et al.* 2008), sobre todo en regiones secas influenciadas por dinámicas territoriales asociadas al crecimiento demográfico y al aumento acelerado de actividades económicas (agricultura, minería, industria) (Maldonado y Vidal 2018).

En regiones como el corredor seco de Nicaragua, donde ocurre un largo periodo seco y una distribución poco definida de la precipitación, existe una alta vulnerabilidad a eventos recurrentes de sequía, ocasionados por el fenómeno El Niño-Oscilación del Sur (ENOS). Van der Zee (2012) y Programa mundial de alimentos (2018) señalan que el área rural donde la agricultura es la principal actividad económica, la variabilidad de la precipitación subvierte un incremento en el riesgo de pérdidas en la producción agrícola de las familias.

Con el fin de superar el desajuste entre la disponibilidad y la demanda natural de agua, el Proyecto Adaptación de la agricultura al cambio climático a través de la cosecha de agua en Nicaragua 2019, cofinanciado por la Cooperación Suiza en América Central (COSUDE) y el Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE) facilitó el establecimiento de obras de cosecha por escorrentía de tipo reservorio, como práctica de adaptación ante la variabilidad y cambio climático.

Las obras de cosecha de agua generalmente se realizan en áreas con potencial de drenaje hacia el reservorio, tomando en consideración canales y desagües naturales (Ríos y Benegas 2022) y pueden almacenar agua durante el periodo lluvioso, que luego puede ser utilizada para producir de forma más segura y garantizar el riego en la época seca.



Figura 1. Sistema de cosecha de agua de escorrentía tipo reservorio con sus componentes: infraestructura o reservorio, área de uso-aprovechamiento del agua (cultivo agrícola) y área de captación-recolección o de recarga hídrica. Proyecto cosecha de agua (2020).

Como parte de un cobeneficio a nivel de cuenca, las obras de cosecha de agua pretenden mejorar la disponibilidad, la captación, la retención, el almacenamiento (superficial, subsuperficial o subterráneo) y la regulación de las aguas de lluvias que precipitan en un determinado territorio, con la finalidad de crear una mayor reserva de agua local o escorrentías menos abruptas y más regulares (Maldonado y Vidal 2018). De acuerdo con lo anterior, un amplio conocimiento técnico para aprovechar al máximo las escasas lluvias que caen y la cantidad de escorrentía que se genera conllevará a una mejor gestión del recurso, sobre todo cuando se pretende establecer cultivos de subsistencia y renta en zonas vulnerables.

Sin embargo, existe una escasa información publicada que describe el impacto de las obras de cosecha de agua en el comportamiento hidrológico a nivel de cuenca aplicando el modelo de la Herramienta para la Evaluación del Suelo y Agua (SWAT, por sus siglas en inglés). Aunado a esto, no siempre se cuenta con conocimientos de cómo estas interactúan en el ciclo hidrológico general a nivel de cuenca, por lo que es necesario aumentar los esfuerzos de investigación en estas áreas.

El balance hídrico es una de las herramientas más usadas en la cuantificación de componentes de entrada/salida de agua de una cuenca, lo cual es un requisito para la gestión del recurso hídrico, dado que este brinda suficiente información para comprender los procesos del ciclo hidrológico. Por lo tanto, este estudio se plantea como un acercamiento a describir las variables hidrológicas que intervienen en el balance hídrico en la cuenca a través de SWAT y trata de dar respuesta a la siguiente pregunta: ¿existe algún cambio (positivo o negativo) sobre estas variables si se incrementa el número de obras de cosecha de agua por escorrentía construidas?

Para la metodología del incremento de obras de cosecha de agua en SWAT, se tomó como referencia a (Rabelo *et al.* 2021). El artículo describe el análisis de una red de estanques grandes y pequeños agregados al modelo de SWAT, a través de la parametrización de variables hidrológicas de datos que corresponden a los estanques. Dicho estudio fue utilizado como guía para definir los parámetros a tomar en cuenta a la hora de agregar información relacionada a las obras de cosecha de agua.

El estudio se realizó en la microcuenca Quebrada Sucia, perteneciente a la subcuenca del Río Inalí, de los municipios de San Lucas y Somoto, del departamento de Madriz, en la región norte del área del corredor seco de Nicaragua. Los resultados son una primera evidencia del impacto de obras de cosecha de agua por escorrentía en el comportamiento de las variables hidrológicas que intervienen en el balance hídrico en la microcuenca. Machiwal *et al.* (2017) menciona que dicho conocimiento dará lugar a optimizar las operaciones, monitoreo y control en estas áreas, lo cual puede ser valioso en la toma de decisiones enfocadas a la conservación del almacenamiento de agua de lluvia y a la contribución a las zonas de recarga en la microcuenca.

1. El período canicular en Nicaragua se presenta entre el periodo del 15 de julio y el 15 de agosto y puede variar según la región (WFP 2018). Los departamentos de Madriz, Nueva Segovia, Estelí, Matagalpa, León y Chinandega son más susceptibles a experimentar sequías severas con precipitaciones más escasas que en el resto del territorio nacional (Bendaña 2018).

2. Metodología

2.1. Ubicación y descripción del área de estudio

Esta investigación se realizó en la microcuenca Quebrada Sucia, que pertenece a la subcuenca del Río Inalí, específicamente en los municipios de San Lucas y Somoto, del departamento de Madriz en Nicaragua; comprende una superficie territorial de 14.58 km² (1458 ha). Geográficamente, se ubica entre las coordenadas 13.45 latitud norte, -86.65 longitud oeste y 13.40 latitud norte, -86.59 longitud oeste. Los límites cardinales son: al norte con la microcuenca Río San Pedro y municipio de Somoto, al sur con el río El Coralillo, al este con la subcuenca Aguas Calientes y al oeste con la subcuenca del río La Camaira.

La microcuenca está integrada por seis comunidades pertenecientes al municipio de San Lucas (San Lucas, La Manzana, Los Canales, El Porcal, El Guaylo y El Mogote) y una compartida con el municipio de Somoto (Santa Rosa).

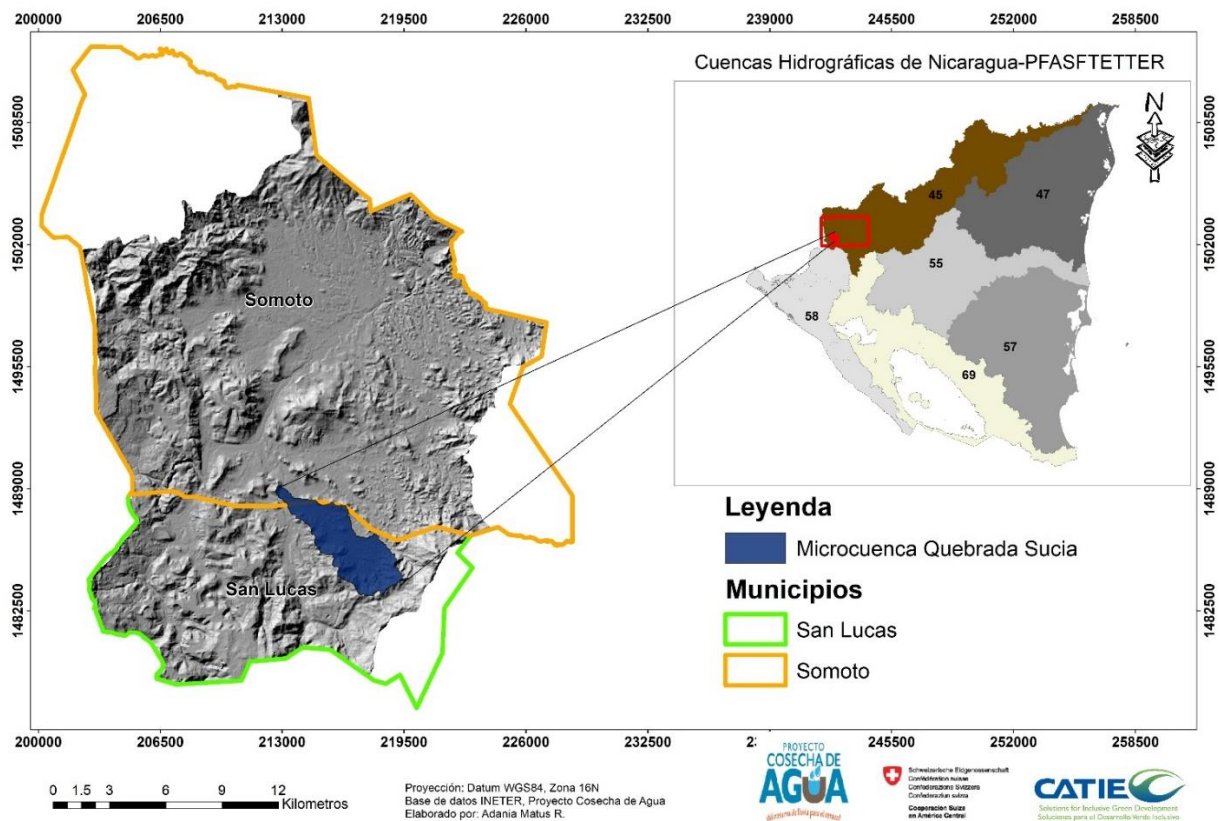


Figura 2 Ubicación geográfica de la microcuenca Quebrada Sucia, Somoto, Nicaragua, 2023

2.2 Diseño y construcción de la metodología

Este estudio tiene un enfoque exploratorio, por lo que el objetivo principal no es elaborar comparaciones estadísticas ni pruebas de hipótesis. Se utilizó un diseño de muestreo no probabilístico por conveniencia, elaborado a partir del análisis de información geoespacial secundaria (topografía, geomorfología, uso de suelo, tipo de suelo) proporcionada por el Instituto de Estudios Territoriales INETER-Nicaragua, datos climáticos mundiales generados por la Administración Nacional de Aeronáutica y Espacio de Estados Unidos (NASA, por sus siglas en inglés) y la ubicación de las obras de cosecha de agua brindadas por el Proyecto Cosecha de Agua.

2.2.1 Descripción del modelo hidrológico empleado para la cuantificación del balance hídrico

La modelación hidrológica es una herramienta fundamental en la generación de información base para la toma de decisiones referentes a alternativas de gestión y manejo de los recursos hídricos. Para la cuantificación del balance hídrico en la microcuenca seleccionada por albergar un conjunto de sistemas de cosecha de agua de escorrentía, se empleó la Herramienta para la Evaluación del Suelo y Agua (SWAT). Consiste en un modelo de parámetros semidistribuidos, capaz de simular numerosos procesos físicos a escala temporal continua (anual, mensual, diaria y subdiaria) en una cuenca hidrográfica (Jodar-Abellan *et al.* 2018). El análisis de componentes del balance hídrico evalúa las características biofísicas de la cuenca (morfología, tipo suelo, temperatura, evaporación, precipitación) (Kelaiya *et al.* 2019). Este modelo en combinación con los sistemas de información geográfica en su interfaz (Arnold *et al.* 1998) permite predecir la producción de agua, escorrentía y sedimentos en la cuenca (Rivera *et al.* 2012; Vigiak *et al.* 2017).

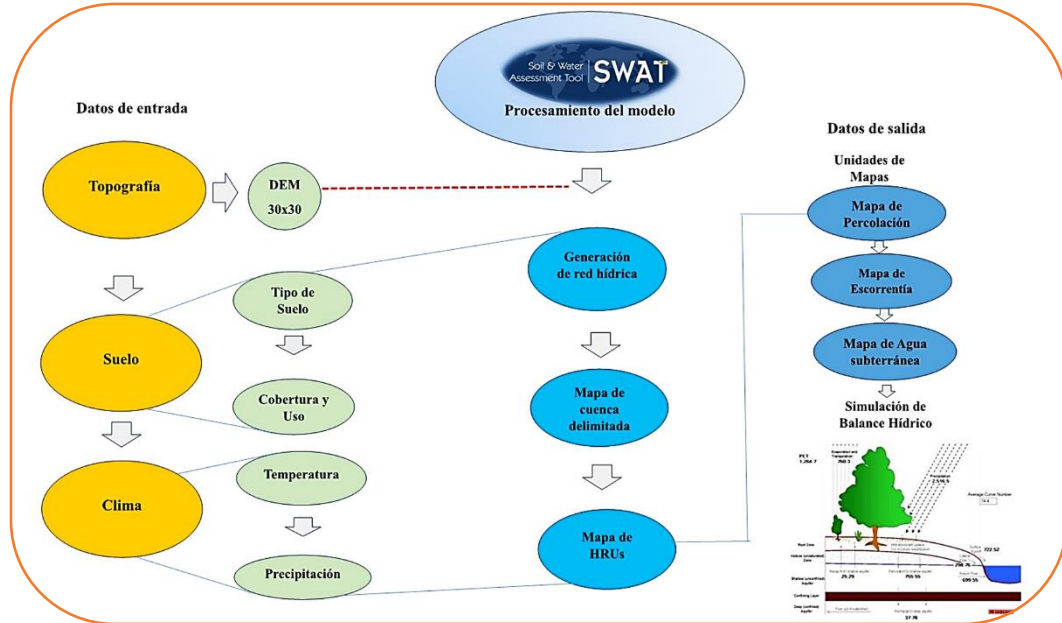


Figura 3. Esquema-resumen del procesamiento modelo de la SWAT. Los círculos se presentan en tres colores, de los cuales el verde representa las variables de entrada, el azul claro representa los datos generados a partir de esas variables y el azul oscuro indica datos de salida una vez se haya corrido el modelo.

Esta simulación de los procesos físicos que conforman el ciclo hidrológico se efectúa con una subdivisión de múltiples unidades agrohidrológicas, también conocidas como subcuencas (Neitsch *et al.* 2005). Esta subdivisión favorece determinar las características distintivas entre cada celda que compone las diferentes subcuencas, como las altitudes, tipo de suelo, coberturas y uso del suelo, que a su vez se definen como unidades de respuesta hidrológica (Dhami *et al.* 2018; Dile *et al.* 2019).

De acuerdo con Jodar-Abellan *et al.* (2018), las unidades de respuesta hidrológica (HRUs, por sus siglas en inglés), representan áreas del terreno con características hidrológicas similares, como el suelo, la topografía y el uso de la tierra (Arnol *et al.* 2002). Cada una de estas tiene un conjunto de parámetros que describen cómo el agua se mueve a través de cada subdivisión y cómo esta interactúa con el suelo, las plantas y la atmósfera.

Estos parámetros hidrológicos varían espacialmente en cada punto de las HRUs. En resumen, la SWAT utiliza estas unidades para simular el ciclo hidrológico y el comportamiento del flujo de agua en la cuenca. A través de este proceso, el modelo puede predecir la estimación diaria de volúmenes de promedio máximo de superficie de escorrentía en cada microunidad o unidad de respuesta hidrológica (Fernández 2016; Uribe 2010). La eficiencia de cálculo del escurrimiento superficial también proporciona datos cuantitativos de la infiltración de agua en el suelo, evaporación y percolación por cada HRUs (Behrends 2011).

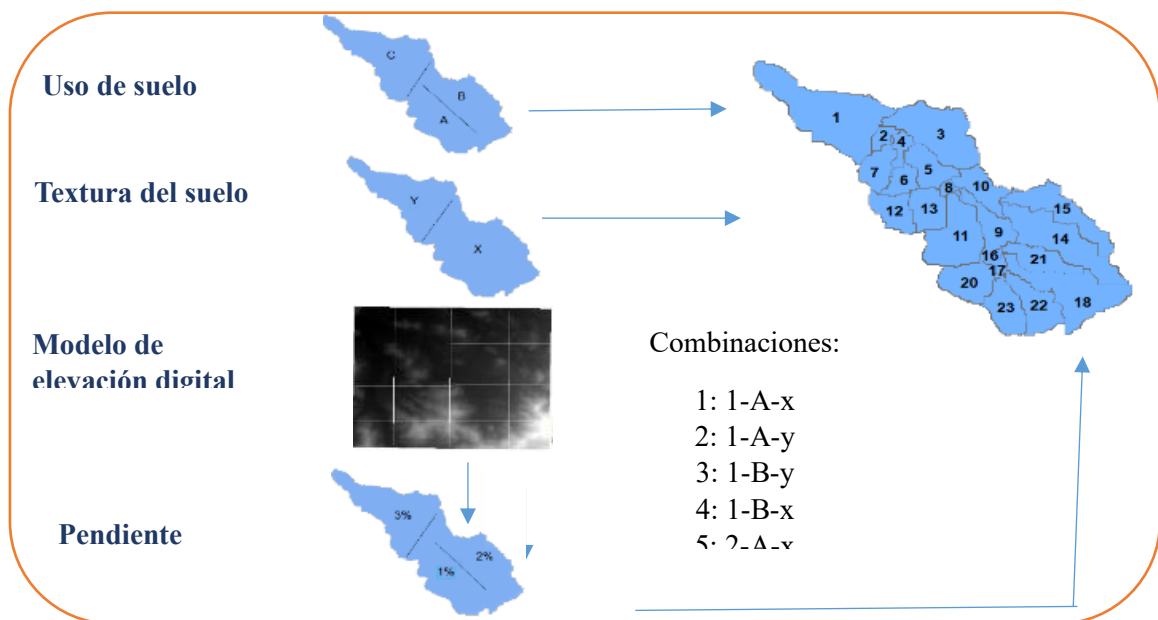


Figura 4. Unidades de respuesta hidrológica en la microcuenca Quebrada Sucia. Adaptado de Hosseiní y Khaleghi (2020) y Briak *et al.* (2016).

2.2.2. Simulación de balance hídrico

Para la estimación del balance hídrico, el modelo de SWAT emplea la siguiente ecuación (Arnol *et al.* 2002 y Neitsch *et al.* 2005):

$$SW_t = SW_0 + \sum (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw})$$

Donde:

SW_t = contenido final del agua del suelo en (mm H ₂ O) en (mm H ₂ O)	Q_{surf} = cantidad de escorrentía superficial en el día i (mm H ₂ O)
SW_0 = contenido inicial del agua del suelo en el día i (mm H ₂ O)	E_a = cantidad de evapotranspiración en el día i (mm H ₂ O)
cT = tiempo en días	W_{seep} = cantidad de agua que percola en el perfil de suelo en el día i (mm H ₂ O)
R_{day} = cantidad de precipitación en el día i (mm H ₂ O)	Q_{gw} = cantidad de flujo de retorno en un día i (mm H ₂ O)

El modelo de SWAT proporciona una representación detallada del ciclo hidrológico en una cuenca hidrográfica. Simula el balance hídrico, calculando los flujos de agua y otros procesos hidrológicos en cada HRUs. Estos procesos incluyen la infiltración, la escorrentía superficial, la evaporación, la transpiración de las plantas, la percolación y la recarga de acuíferos.

SWAT realiza el proceso en dos etapas: la primera es la terrestre, donde se calcula la cantidad de agua y sedimentos que llegan a la red hídrica principal en cada subcuenca. Esto se simula utilizando una ecuación de balance hídrico (Jodar-Abellan *et al.* 2018). La segunda etapa es el enrutamiento del ciclo hidrológico, donde los sedimentos y el agua se transportan hacia la red hídrica principal (William y Hann 1972, citado por Uribe 2010). Esto ocurre cuando el agua y los sedimentos se mueven desde la parte alta de la cuenca hasta las zonas más bajas, conocidas como punto de aforo o salida.

La simulación hidrológica en el área de estudio se definió con un periodo de 19 años, con un ajuste de 3 años de calentamiento (NYSKIP)², esto con el fin calibrar y validar el modelo, además de reconocer los datos (Gamboa 2018).

2.3 Configuración de los datos de entrada

Antes de llevar a cabo modelaciones hidrológicas es esencial comprender las diferentes variables (topografía, clima, suelo, uso y cobertura del suelo) que componen el modelo y permiten obtener el resultado final de los objetivos de estudio. En ese sentido, para comprender los datos de entrada, se hace un énfasis en el control de la calidad de los datos empleados, con el fin de mejorar la precisión.

2.3.1 Topografía

2.3.1.1 Modelo de elevación digital (DEM)

Los modelos de elevación digital son estructuras numéricas de datos que representan la distribución espacial de las altitudes (Pusineri *et al.* 2005) y pueden ser utilizados en el análisis de la topografía de la cuenca, debido a que este tiene un gran impacto en los procesos geomorfológicos e hidrológicos. Dichos procesos pueden modificar el paisaje y a su vez pueden ser mapeados a partir de sistemas de información geográfica (Moore *et al.* 1991).

El modelo fue implementado como una extensión QSWAT3 v1.6.5 for QGIS3; fue utilizado un DEM con una resolución de espacial nativa de 5x5 metros obtenido de Alos Palsar/ ASFDData Search VERTEX, como principal dato de entrada para la extracción de la red hídrica y delimitación de la microcuenca. Previamente, se procedió a la corrección del DEM a través de la herramienta *fill sinks* (Wang & Liu) en SAGA 7.8.2.

2. Neitsch *et al.* (2002) se refiere al período de calentamiento o equilibrio en algunas simulaciones. Este período de equilibrio es especialmente necesario cuando la simulación principal es de corta duración, para facilitar que se complete el ciclo hidrológico de manera adecuada.

2.3.1.2 Delimitación y ajuste de la microcuenca

Como primer paso en la delimitación, se llevó a cabo un recorrido en campo sobre los límites existentes en la microcuenca. Posteriormente, se utilizó el modelo de elevación digital para definir la red hídrica (umbral de escorrentía de 10 ha) y, con base en la definición del punto de salida sobre el cauce principal, el modelo delineó las divisorias de los parteaguas a partir de las elevaciones del terreno.

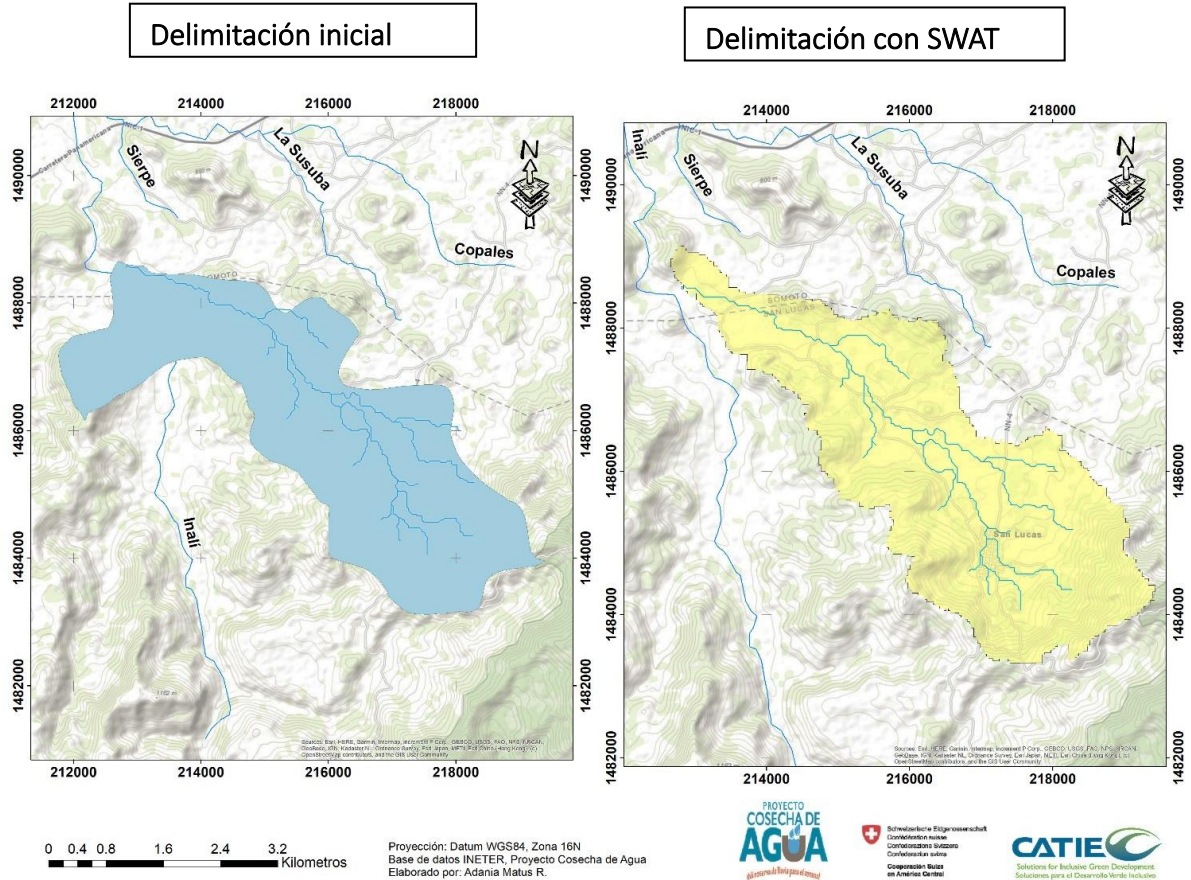


Figura 5 Comparativo de la delimitación inicial y ajuste generado utilizando SWAT en la microcuenca Quebrada Sucia

2.3.2 Variables de suelo y clima

2.3.2.1 Uso y cobertura del suelo

La cobertura y el uso del suelo se encuentra altamente relacionado con la escorrentía superficial. Según Humphreys (1991) un alto porcentaje de suelo desnudo o con pasturas sobre pastoreadas tiene mayor incidencia en la intensidad de escorrentía superficial en suelos provistos de árboles o que cuentan con un incremento en la densidad de cobertura vegetal. Por su parte, la cobertura arbórea y la implementación de sistemas silvopastoriles suelen tener mayor beneficio en lo que respecta a la infiltración y recarga del acuífero en la cuenca hidrográfica (Ríos *et al.* 2007).

La distribución espacial de la cobertura y el uso del suelo se obtuvo de la cartografía de INETER 2018 en formato vector. La capa vectorial clasifica nueve tipos de categorías de uso del suelo, la cual posteriormente fue convertida a formato ráster, tomando en cuenta las categorías equivalentes que tiene el modelo en su base de datos y a través de la asignación de códigos de identificación, acordes con la simbología de SWAT (Cuadro 1).

Cuadro 1. Categorías de uso de suelo-equivalencia (LUC, por sus siglas en inglés)-SWAT

ID	Nombre de la clase	Equivalencia SWAT	Hectáreas
1	Bosque latifoliado	FRST	115.452
2	Bosque de pino	PINE	30.081
3	Centros poblados	URML	77.38
4	Cultivos anuales	CRDI	41.656
5	Cultivos perennes	COFF	6.483
6	Pasto	RNGE	679.198
7	Tacotal	SHRB	91.571
8	Vegetación arbustiva	RNGB	419.136

Los porcentajes de cobertura predominantes en la microcuenca son los pastos, con un área equivalente al 46.49 %, seguidos por la clase de vegetación arbustiva (28.69 %), el bosque latifoliado (7.90 %) y el bosque de pino (2 %). Los dos últimos son los de menor porcentaje de cobertura y se ubican en el área protegida Tepesomoto-La Pataste.

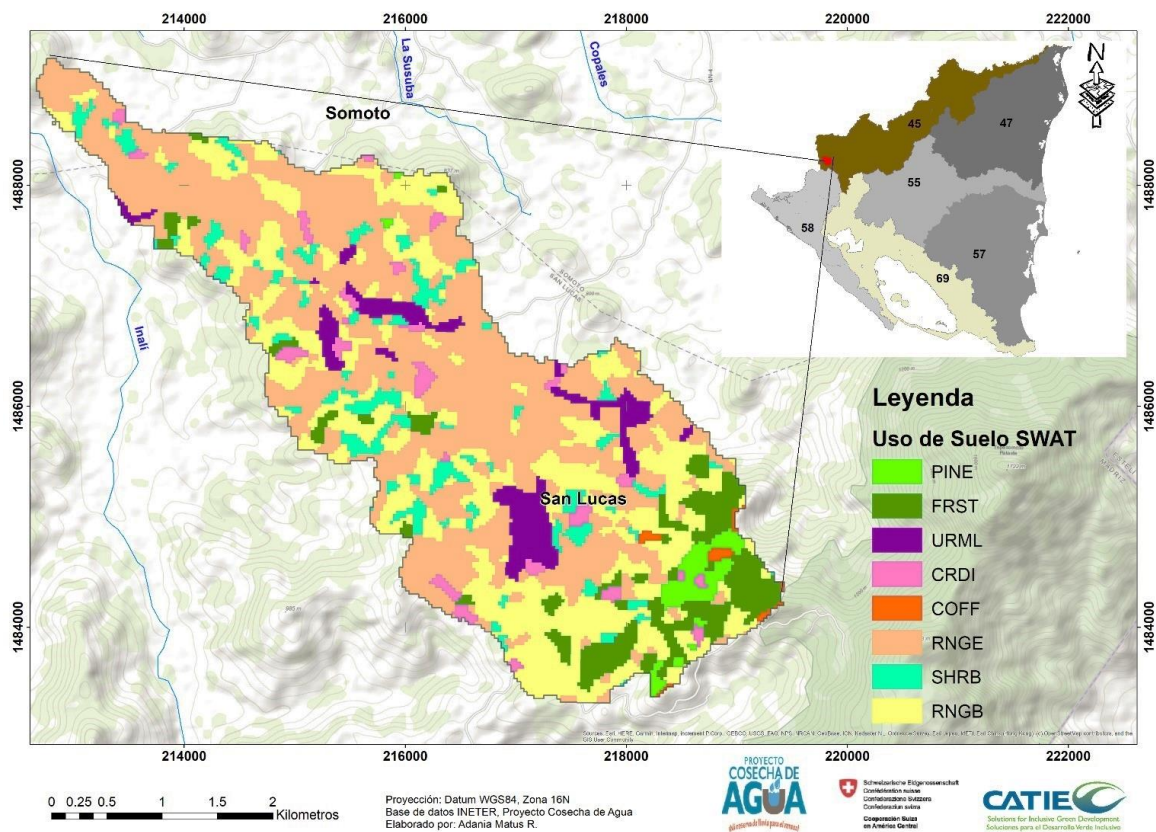


Figura 6 Uso y cobertura del suelo según categorías equivalentes de la SWAT capa vectorial: INTER (2018).

2.3.2.2 Clasificación del suelo

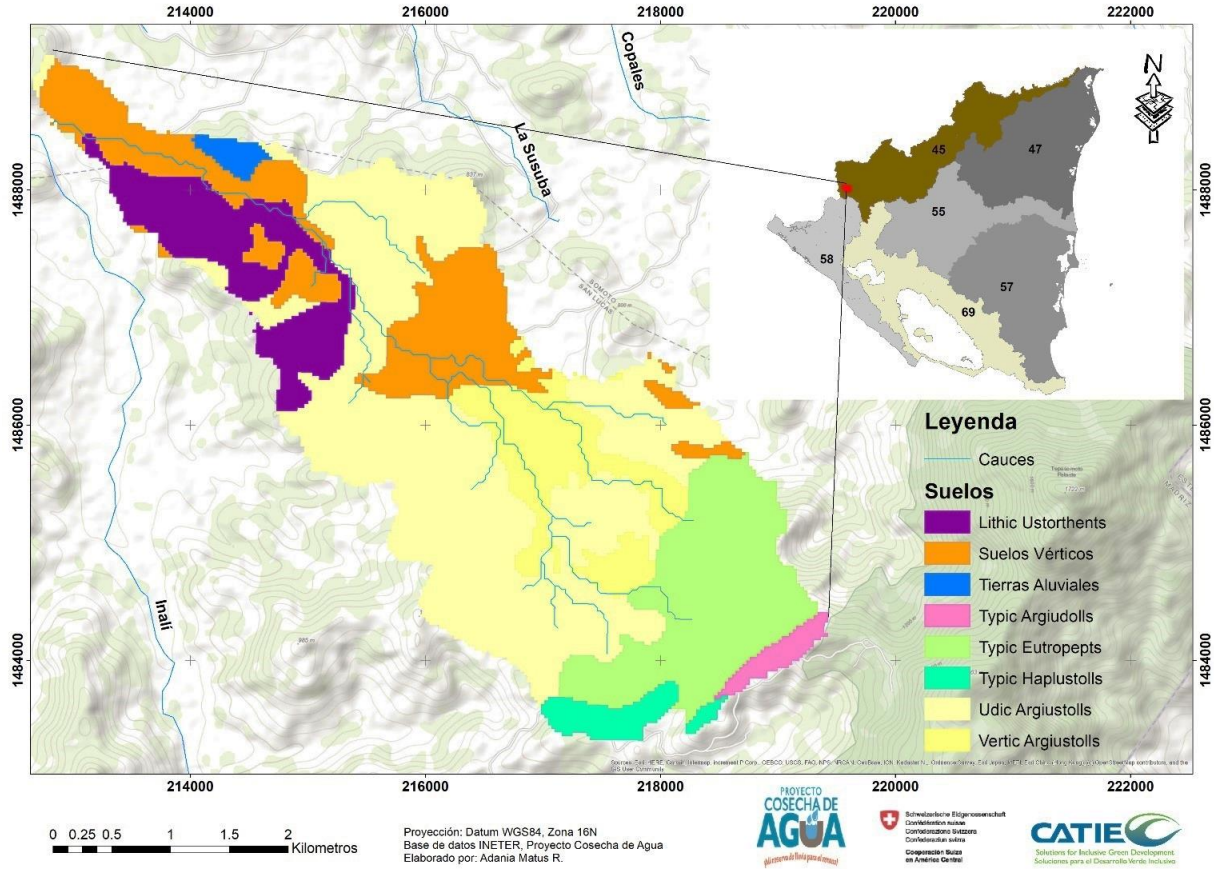


Figura 7 Clasificación de los suelos, microcuenca Quebrada Sucia. Capa vectorial: INETER (2020).

Núñez (1981) menciona que las características del suelo tienen una fuerte influencia en las zonas de recarga hídrica en una microcuenca como es la capacidad de infiltración, dado que los suelos con textura gruesa y porosos suelen ser mayormente permeables, a lo que se atribuye un aumento en la recarga hídrica. Por el contrario, los suelos de textura fina, arcillosos, pesados y compactados impiden la permeabilidad del agua, lo que disminuye la recarga hídrica.

Los archivos espaciales y tabulares de suelo requeridos por el modelo de SWAT fueron elaborados con base en información proporcionada por INETER (2020) en formato vector. A partir de estos datos, se identifican ocho subgrupos de tipos de suelo, donde el subgrupo Udic Argiustolls representa una mayor proporción de la superficie con 620.87 ha, que equivale al 44.16 % del área total de la microcuenca (ver Mapa 4). Este tipo de suelos tiene una posibilidad de recarga hídrica moderada dado que presentan texturas franco-arcilloso-arenosas predominantes (Núñez 1981). Por su parte, los suelos Lithic Ustorthents se ubican en la parte baja, al noreste de la microcuenca; sin embargo, estos apenas alcanzan el 10.59 % del área total.

Cuadro 2. Textura del suelo, microcuenca Quebrada Sucia

Suelos	SWAT	Textura	Porcentaje de área
Lithic Ustorthents	LITHUS	Fr-Arenoso	10.59
Suelos vérticos	SUVER	Fr-Loam	13.91
Tierras aluviales	TIALU	Clay-Loam	0.97
Typic Argiudolls	TYPARGI	Clay-Loam	1.41
Typic Eutrudepts	TYPEUTRO	Silty-Clay	16.29
Typic Haplustolls	TYPHAPLUS	Sandy-Loam	2.62
Udic Argiustolls	UDICARGI	Sandy-Clay-Loam	44.16
Vertic Argiustolls	VERTIAR	Sandy-Clay-Loam	10

La construcción de las propiedades de cada tipo de suelo requeridos por SWAT (textura, densidad aparente y agua disponible) se implementó a partir del programa Soil Water Characteristics SPAW-USDA (Arnold *et al.* 2010; Nachtergaele *et al.* 2012). Por consiguiente, el programa también facilita información sobre la saturación del suelo y la conductividad hidráulica, a partir de las características de texturas en el suelo (contenido de arena, limo y arcilla) (Saxton 2002). Los resultados de Matric Bulk Density, Available Water y Sat. Hydraulic Cond. fueron denominados y empleados como SOL_BD, SOL_AWC y SOL_K (ver Cuadro 3).

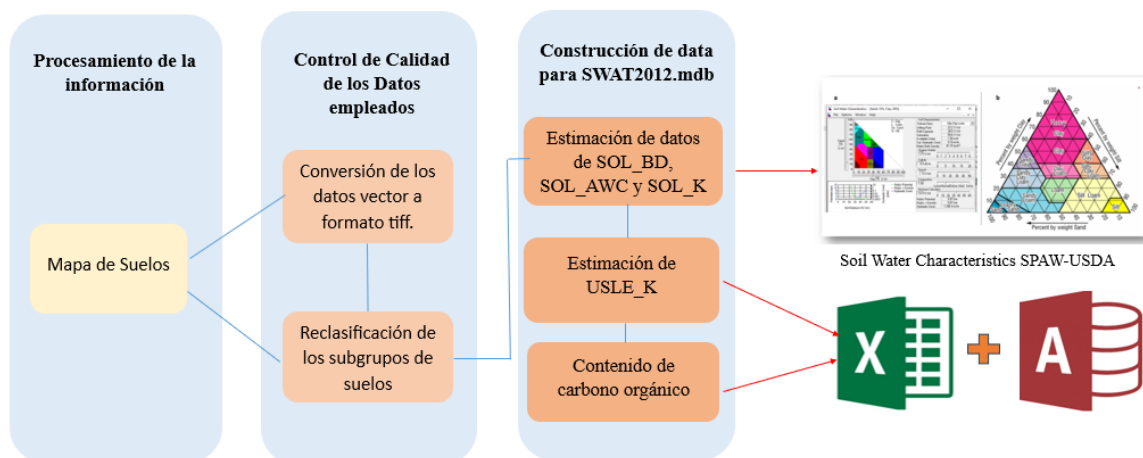


Figura 8. Esquema de procesamiento y construcción de la data de suelos para la SWAT

La estimación de erodabilidad del suelo de la Ecuación Universal de la Pérdida de Suelo (USLE_K) fue calculado en Microsoft Excel con las fórmulas detalladas en el Capítulo 22 del *Soil and Water Assessment Tool Input/Output File Documentation*, publicado por Neitsch *et al.* (2004).

Su fórmula es:

$$K_{USLE} = \frac{0.00021 \cdot M^{1.14} \cdot (12 - OM) + 3.25 \cdot (c_{soilstr} - 2) + 2.5 \cdot (c_{perm} - 3)}{100}$$

Donde:

K_{USLE} : es el factor de erodabilidad del suelo.

M: es el parámetro del tamaño de las partículas.

OM: es el porcentaje de materia orgánica.

Csoilstr: es el código de la estructura del suelo en la clasificación del suelo. Cperm: es el perfil de las clases de permeabilidad.

Cuadro 3. Parámetros de datos para useroil del modelo SWAT

TEXTURA	GRP HYD	SOL_ ZMX	SOL_ Z1	SOL_ BD1	SOL_A WC1	SOL_ K1	SOL_ CBN1	SOL_ ALB1	USLE _K1
Franco-arenoso	B	400	250	1.59	0.08	44.45	0.29	0.491	0.166
Franco-arenoso	D	1500	400	1.26	0.13	6	3.48	0.054	0.117
Franco-arcilloso	C	2150	160	85.2	1.78	0.3	1.74	0.18	0.128
Franco-arcilloso	C	1800	300	71.67	1.86	0.75	4.35	0.029	0.125
Arcillo-limoso	D	675	100	78.81	1.78	0.22	2.03	0.147	0.146
Franco-arenoso	C	2025	225	81.65	1.33	1.15	3.48	0.054	0.114
Franco-arcilloso- arenoso	C	1400	300	82.22	1.53	0.42	3.48	0.054	0.113
Franco-arcilloso- arenoso	C	1250	200	79.69	1.61	0.75	3.48	0.054	0.121

NOTA: La descripción de cada parámetro se encuentra en Anexos*.

2.3.3 Variables climáticas

Tras elaborar las HRUs, se incorporaron en SWAT series diarias de precipitación, temperatura máxima y mínima de las estaciones meteorológicas localizadas en las inmediaciones y en el interior de la microcuenca. Los datos utilizados comprendieron registros para un periodo de 19 años (2001-2019).

En el área de estudio, no existe una red densa de estaciones climáticas; por ende, los datos climáticos se obtuvieron a partir de datos globales meteorológicos de la plataforma Global Weather Data for SWAT³ (por sus siglas en inglés). Se seleccionaron cuatro estaciones climáticas (Figura 9), las cuales fueron seleccionadas de acuerdo con la proximidad geográfica a la zona de estudio. Seguidamente, se calcularon diferentes parámetros estadísticos a través del modelo de Macro clima WEN_user, el cual permite simular el comportamiento de la precipitación y la temperatura en la zona de estudio. Sin embargo, para que este pueda simular el proceso de forma efectiva, se precisa de al menos tres estaciones climáticas (Morales *et al.* 2010).

Para la estimación de la evapotranspiración, debido a que solo se disponía de datos de precipitación y temperatura, se seleccionó el método de Hargreaves (Hargreaves *et al.* 1985) a partir de la información climática registrada por las estaciones meteorológicas.

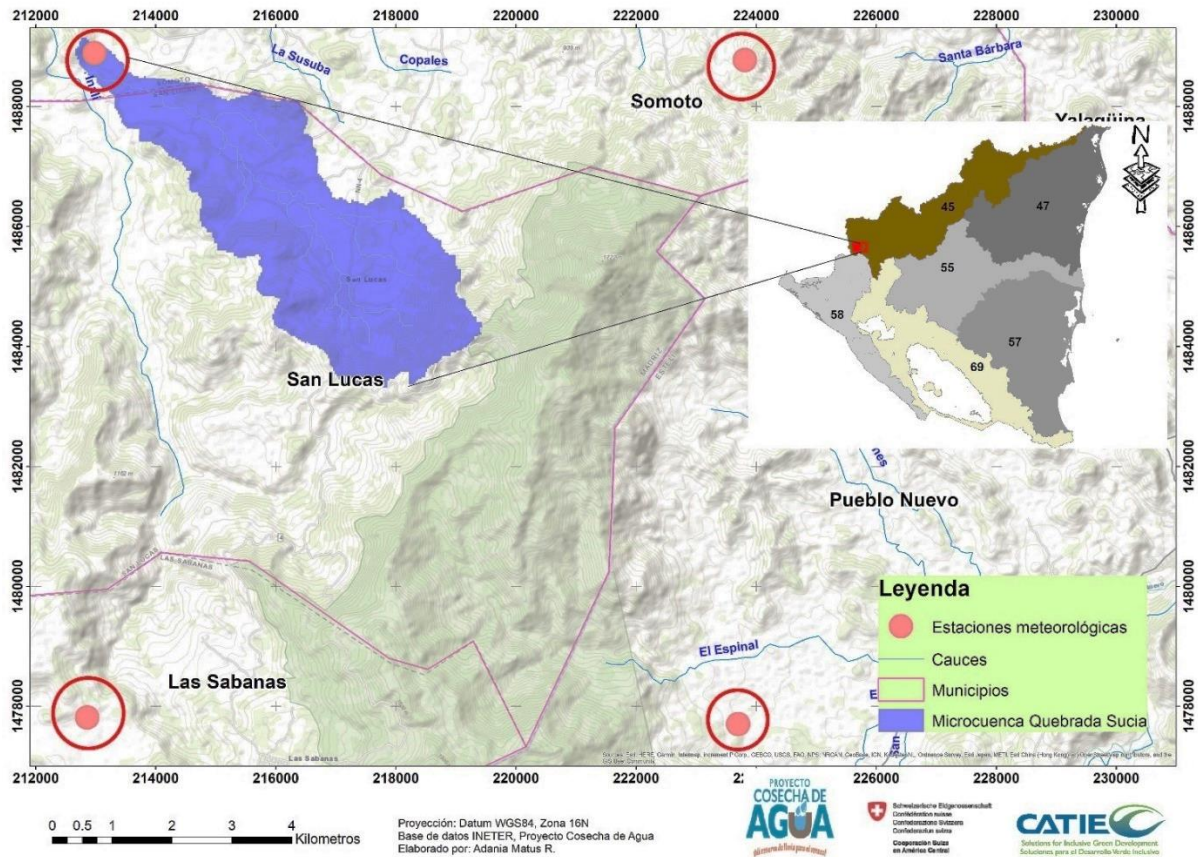


Figura 9 Estaciones meteorológicas globales de precipitación y temperatura, microcuenca Quebrada Sucia.

3. Fuente: <https://www.uoguelph.ca/watershed/w3s/>

Como resultado del proceso, se obtuvieron promedios mensuales generados de los valores diarios de las estaciones meteorológicas en un lapso de 19 años. En la figura 10, se observa que la temperatura máxima promedio de la zona varía entre los 30° y los 35°C y una mínima entre 20° y 25°C. A lo largo del periodo registrado, las precipitaciones presentan un aumento en los meses de mayo a junio, los cuales registran un promedio que varía entre 169 y 189 milímetros. Este dato corresponde al inicio de la temporada lluviosa en el país. La disminución de los meses de julio y agosto se deben específicamente a un evento esporádico de sequía (canícula) con un periodo climático que dura alrededor de un mes. Su fecha inicial anualmente es el 15 de julio y finaliza el 15 de agosto (WFP 2018). No obstante, algunos años suelen ser más extremos que otros, lo cual hace que el periodo de este se extienda, prolongando la sequía en la región.

La zona de estudio es más susceptible a experimentar sequías severas con precipitaciones más escasas que en el resto del territorio nacional. El recurso hídrico en esta zona se divide en tres usos primordiales: 1. consumo y uso doméstico, 2. consumo de los animales (mayormente para ganado bovino), y 3. agricultura (riego). Esta última se encuentra estrechamente vinculada con el clima y la variabilidad de la precipitación, que a su vez incrementa el riesgo de pérdidas en la producción agrícola de las familias (Bendaña 2018).

Esta variabilidad de las lluvias también influye en las fuentes de agua superficiales, las cuales, por características geológicas, en su mayoría son intermitentes, lo que las convierte en insuficientes. Por ello, una de las alternativas propuestas como una solución basada en la naturaleza (SbN) es la construcción de reservorios de agua por escorrentía, los cuales favorecen el almacenamiento del agua y, en la época seca, potencian la productividad de las tierras de cultivo y reducen el riesgo de malas cosechas por efectos del cambio climático.

Climograma referencial microcuenca Quebrada Sucia 2001-2019

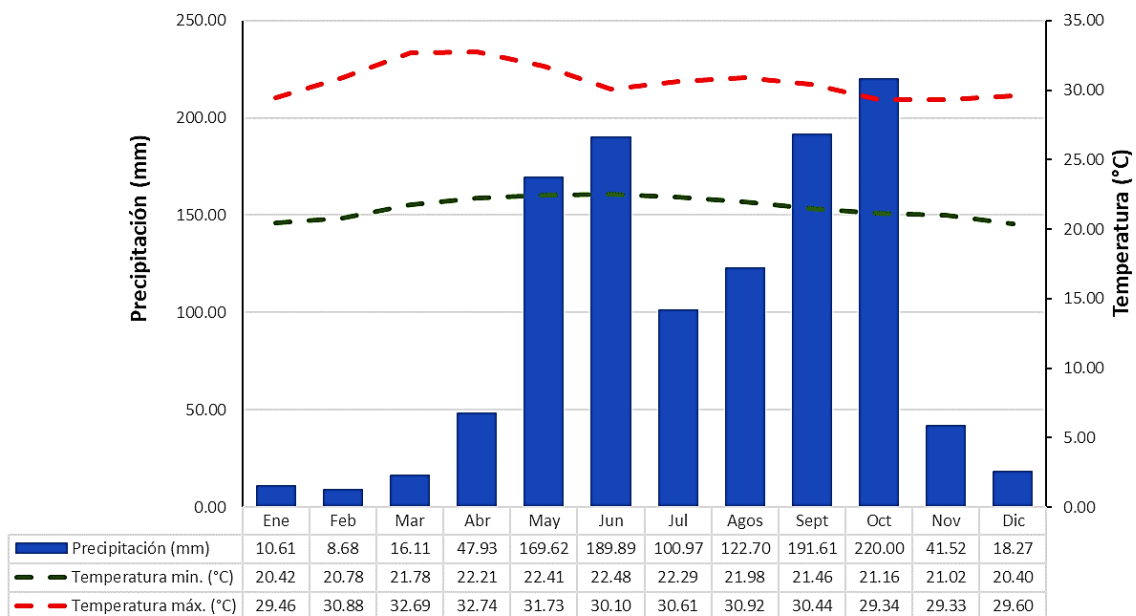


Figura 10. Climograma referencial. Estos son datos promedios mensuales del periodo 2001-2019 calculados a partir de la información de la estación climática 1

2.4 Simulación base del balance hídrico en la microcuenca

A partir de la metodología descrita para la corrida del modelo de la SWAT, se obtuvo una primera simulación base del ciclo hidrológico a nivel de la cuenca, sin la intervención de obras de cosecha de agua por escorrentía de tipo reservorio (OCAS). Esto favoreció adquirir información cuantitativa de las variables hidrológicas (agua subterránea, percolación y humedad del suelo) por cada uso y tipo de suelo para cada subcuenca delimitada. Los datos fueron comparados con los escenarios de incremento de nuevos sitios potenciales para la implementación de OCAS. Para el período de calibración y validación, se establecieron tres años de calentamiento, una humedad del suelo inicial (FFCB) de 0.2 y el cálculo de evapotranspiración bajo la metodología de Hargreaves.

2.5 Muestreo de conductividad hidráulica saturada de campo (Kfs) en obras de cosecha de agua por escorrentía (OCAS) de tipo reservorio, en campo

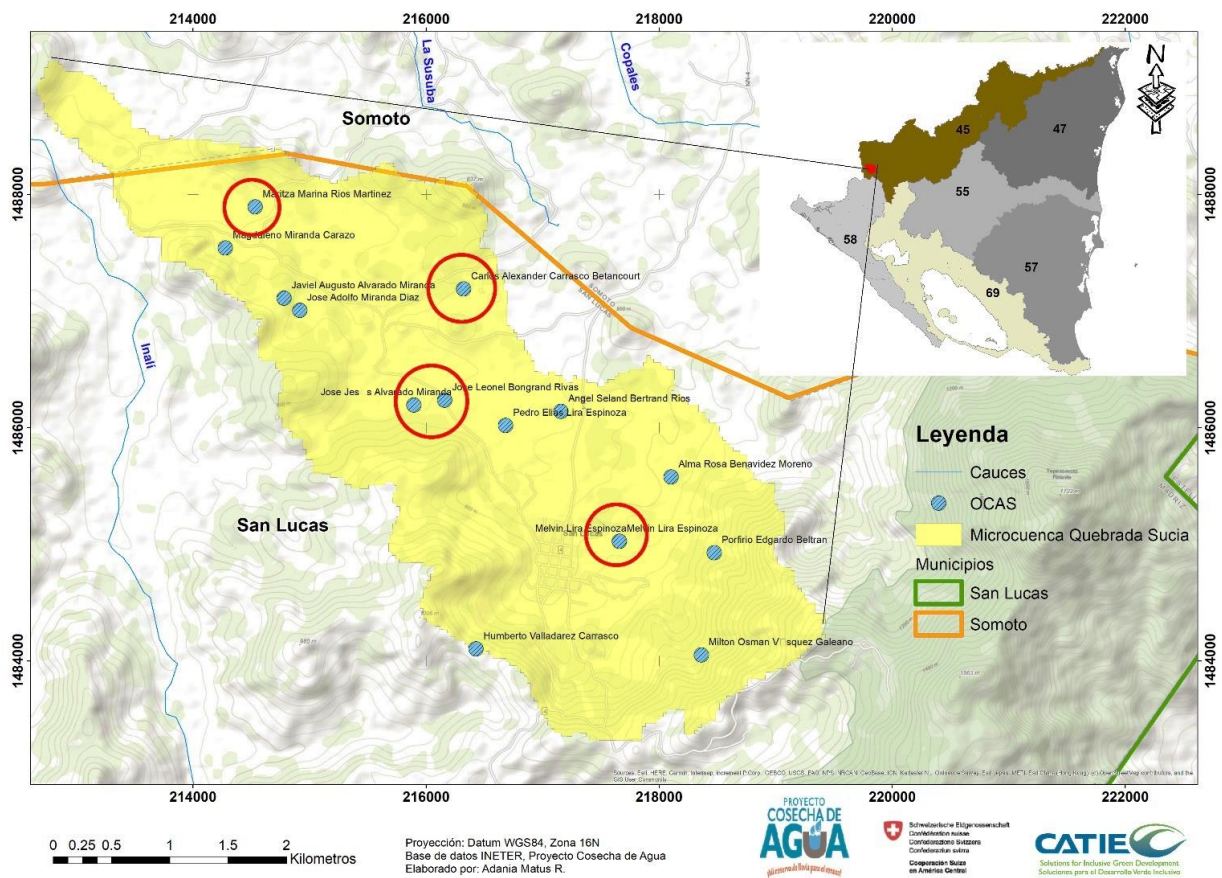


Figura 11 . Ubicación de obras de cosecha de agua por escorrentía de tipo reservorio OCAS. Los círculos en rojo colocados en el mapa señalan las OCAS seleccionadas para muestreo de conductividad hidráulica saturada en campo (Kfs).

La selección de los sitios de muestreo se definió de acuerdo con la disponibilidad, accesibilidad y calidad de datos secundarios. De las 14 obras ubicadas en la microcuenca, fueron seleccionadas 5 obras de cosecha de agua de tipo escorrentía. Estas obras se encuentran actualmente en buen funcionamiento, tienen una capacidad de almacenamiento de alrededor de 1500m³, una profundidad promedio de 1.50 m y un radio de 2500 m.

El muestreo se elaboró utilizando un infiltrómetro automatizado para medir la permeabilidad y conductividad hidráulica saturada de campo (Kfs) en el suelo (SATURO). Este permite estimar el comportamiento o la capacidad con la que un fluido puede moverse a través de los espacios porosos o fracturas en condiciones de saturación de campo a lo largo del tiempo. Se utilizó el anillo de inserción de 5 cm de ancho y 14 cm de largo, el cual fue diseñado principalmente para sitios con suelos pobres en cobertura vegetal. Con este, se reduce el impacto del anillo infiltrómetro y es recomendado para la mayoría de los sitios.

Se identificaron dos tipos de suelo en el sitio, descritos en el Cuadro 4. Se exponen los tiempos de remojo y cabezal de presión que indica el manual del infiltrómetro SATURO.

Cuadro 4. Configuraciones de tiempo de remojo y sistema de presión, infiltrómetro SATURO

Tipo de Suelo	Tiempo de remojo (min)	sistema de baja presión (cm)	Sistema de presión alta (cm)	Tiempo de espera a presión (min)	Ciclos de presión	Total del tiempo de corrida (min)
Arena arcilloso seco	25	5	10	15	3	115
Arena arcilloso húmedo	15	5	10	15	2	75
Franco limoso seco	30	5	15	20	3	150
Franco limoso húmedo	15	5	15	20	2	95
Arcilla seca (estructura pobre)	30	5	20	25	3	180
Arcilla húmeda (estructura pobre)	15	5	20	25	2	115
Arcilla seca (estructura fuerte)	25	5	10	20	3	145

NOTA: Estos valores son solo un punto de partida aproximado.

2.6 Diseño de escenarios de incremento de obras de cosecha de agua por escorrentía de tipo reservorio

El Proyecto cosecha de agua, indica que la zona de captación de un sistema de obra de cosecha de agua de escorrentía generalmente corresponde a áreas con potencial de drenaje hacia el reservorio, tomando en consideración canales y desagües naturales, el área de reservorio hace referencia a una estructura que tiene como objetivo captar y almacenar agua de lluvia son obras semi excavadas, tienen un volumen promedio de 800 a 1500 m³ y un tamaño promedio es de 2,500 m².

Los sitios apropiados para construir las obras deben cumplir algunas características biofísicas (pendientes, tipo de suelo y cobertura) específicas (Cuadro 5).

Cuadro 5. Principales insumos para la aplicación de la herramienta geoespacial cosecha H₂O

Dato	Descripción del dato	Resolución	Fuente	Formato
DEM	Modelo de elevación digital	-	Alos Palsar/ SearchVERTEX	Raster.Tiff
Uso y Cobertura de suelo	Tipos de coberturas	-	INETER-Nicaragua	Raster.Tiff
Contenido de arcilla	Textura del suelo	-	ISRIC world soil information	Raster.Tiff

Para los efectos del cumplimiento de los objetivos, se aplicó como metodología la Herramienta Geoespacial para la identificación y selección de sitios potenciales para construcción de obras de cosecha de agua de escorrentía en el Corredor Seco Centroamericano (2022), a partir del Proyecto Adaptación de la agricultura al cambio climático a través de la cosecha de agua en Nicaragua.

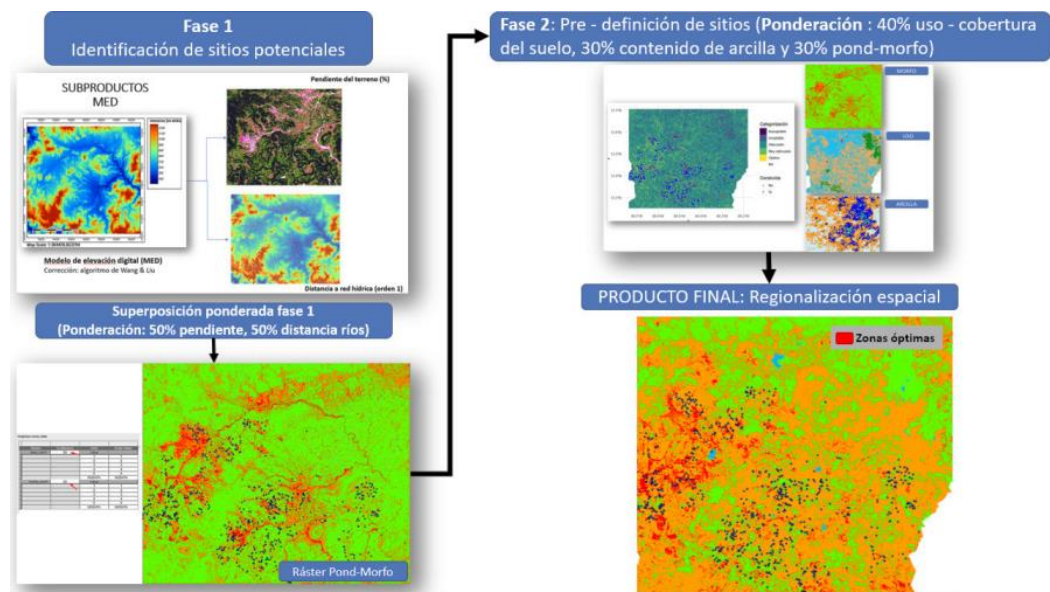


Figura 12. Regionalización de zonas potenciales para la identificación de nuevos sitios potenciales para obras de cosecha de agua (OCAS). Ríos y Benegas (2022).

A través de la herramienta, se identificaron 189 sitios potenciales para el establecimiento de obras de cosecha de agua, con base en la topografía e hidrología de la zona de interés. A partir de este resultado, se analizaron tres escenarios posibles con el fin de valorar el impacto de los efectos acumulativos de obras de cosecha de agua a nivel de microcuenca.

2.6.1 Agregación de obras al modelo de la SWAT

Luego de la delimitación de la cuenca, se colocaron al modelo las OCAS, sobre los afluentes de la red fluvial principal. La influencia de las obras se realizó considerando tres escenarios descritos a continuación:

a. Escenario de referencia 1 (obras actualmente construidas)

Actualmente, hay un total de 14 obras establecidas en la microcuenca. Para la simulación hidrológica, se estableció un umbral de escurrimiento de 10 ha para todos los escenarios, incluido el de la simulación base, con el objetivo de homogeneizar el análisis en los siguientes escenarios y aumentar el número de obras de cosecha de agua incluidas a la SWAT.

b. Escenarios 2 y 3

La clasificación de los sitios potenciales se efectuó en función de la cercanía a un umbral de escurrimiento y a partir del total de sitios potenciales de OCAS se estableció un escenario posible de incremento del 25 % (47 OCAS). Debido a la baja densidad de la red hídrica, se clasificaron obras en función de la cercanía al umbral de escurrimiento de 10 ha. A partir de ello, se creó un área de influencia de 50 x 50 metros y esto se ejecutó a través de la herramienta *buffer* de Qgis 3.24. Posteriormente, fue superpuesto con los 47 puntos de OCAS. De este último proceso, se obtuvo como resultado un total de 22 nuevos sitios para el establecimiento de obras de cosecha de agua por escorrentía superficial. Para el escenario 3, se siguió el mismo procedimiento con un aumento del 50 % (89 OCAS), del cual se simularon 53 puntos para sitios idóneos para el establecimiento de OCAS.

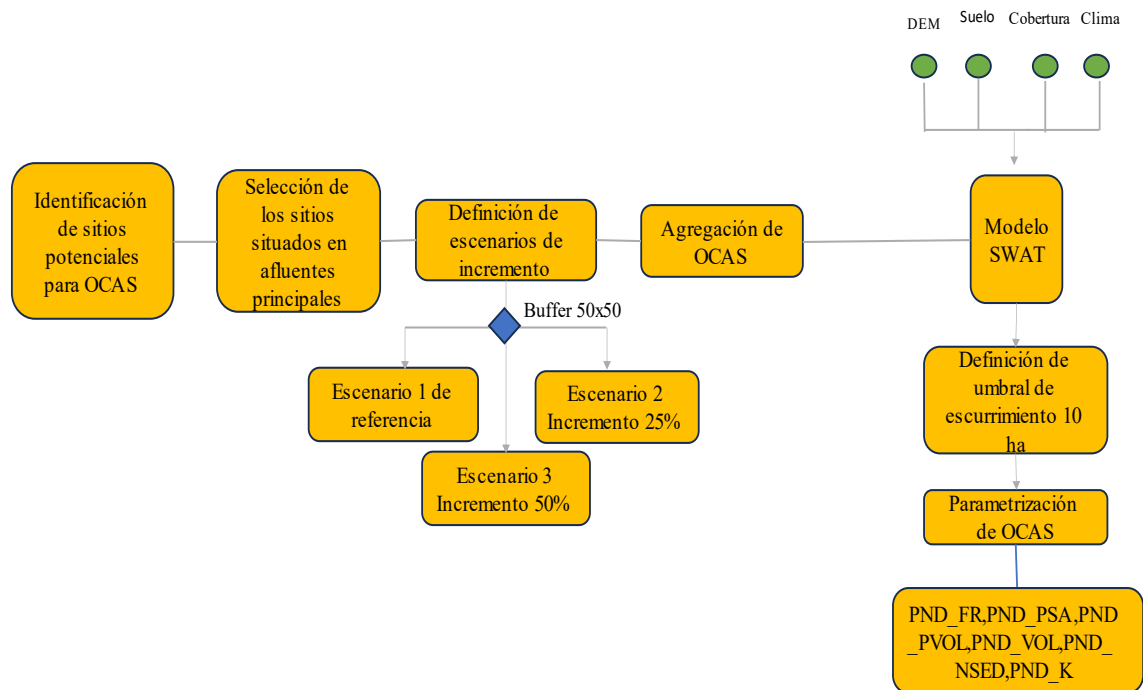


Figura 13. Diagrama resumen de métodos aplicados en la implementación de escenarios de incrementos de obras de cosecha de agua agregados a SWAT

NOTA: La definición de cada parámetro se presenta en el Cuadro 6.

c. Parametrización de las obras de cosecha de agua por escorrentía en el modelo de la SWAT

Las obras de cosecha de agua fueron agregadas directamente al modelo como “ponds” (lagunas). Se modificó el archivo pnd de la base de datos de los proyectos, en el cual se estimaron los parámetros más relevantes para el estudio. Las variables como PND_PSA, PND_PVOL se obtuvieron a través de información proporcionada por el Proyecto Cosecha de Agua en Nicaragua, PND_K se tomó a partir de datos tomados en campo. En el Cuadro 5, se describe cada uno de los parámetros colocados en el modelo.

Cuadro 6. Parametrización de las obras de cosecha de agua por escorrentía, implementadas en el modelo de la SWAT

PARÁMETROS	SUBCUENCAS				
	1	2	3	4	5
PND_FR porcentaje de la subcuenca cubierta de obras	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
PND_PSA (ha) superficie del estanque	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
PND_PVOL (10 ⁴ m ³) volumen de agua que almacena la obra	80	80	80	80	80
PND_ESA (ha) altura al aliviadero de emergencia	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
PND_EVOL (10 ⁴ m ³) volumen de agua al aliviadero de emergencia	150	150	150	150	150
PND_VOL (10 ⁴ m ³) volumen de agua inicial	0	0	0	0	0
PND_SED (mg/l) sedimentos iniciales	0	0	0	0	0
PND_NSED (mg/l) sedimentos permanentes	714.56	705.29	692.60	1108.66	1752.70
PND_K (mm/h) conductividad hidráulica	165.13	165.13	165.13	165.13	165.13

NOTA: En el cuadro, se observan únicamente cinco subcuencas debido a que el número de subcuencas delimitadas dificulta su inclusión textual completa.

3. Resultados

3.1 Morfometría de la microcuenca

Cuadro 7. Resumen de parámetros morfométricos de la microcuenca Quebrada Sucia

Parámetros	Símbolo	Valor
Perímetro(km)	P	28.40
Área (km ²)	A	14.64
Longitud máxima (km)	LM	7.98
Longitud cauce principal (km)	LCP	7.16
Ancho de cuenca	AC	1.83
Desnivel altitudinal	DA	0.00
Factor de forma	Ff	0.23
Coefficiente de compacidad	Kc	2.08

2.2.1 Perímetro y ancho de la microcuenca

El perímetro es la medición de la línea que rodea la cuenca hidrográfica (Gaspari *et al.* 2012); en otras palabras, el perímetro es la suma de todos los lados que delimitan la cuenca. En el caso de la microcuenca Quebrada Sucia, el valor es de 28.40 km y un ancho 1.83 km, lo que hace relación al perímetro y longitud axial de la microcuenca.

3.2.2 Longitud y pendiente del cauce principal

La longitud del cauce principal es la cuantificación del escurrimiento principal de la microcuenca, que es medida desde la parte más alta hasta su salida. El análisis de este parámetro brinda información sobre el tiempo de concentración en la mayoría de los índices morfométricos (Fuentes 2004). La pendiente del cauce principal de la microcuenca Quebrada Sucia es de 7.16 km.

3.2.3 Elevaciones

En la microcuenca, se ubican algunas planicies de la depresión montañosa de Somoto. Presenta un relieve accidentado, con laderas muy escarpadas en las partes altas y con altitudes que varían desde 666 msnm hasta los 1 326 msnm. El punto de elevación más alto se localiza en la montaña Tepesomoto-La Pataste, el cual alcanza 1 730 msnm.

3.2.4 Desnivel altitudinal

Este parámetro se obtiene de la diferencia entre la altura máxima y mínima. El desnivel altitudinal para la microcuenca Quebrada Sucia es de 660 msnm.

3.2.5 Índice de compacidad (Kc)

El índice de compacidad o índice de Gravelius (Kc) expresa la relación entre el perímetro de una cuenca y el perímetro de un círculo de área equivalente. La microcuenca denota una compacidad 2.08, resultado de una clase de forma III oval-oblonga rectangular, lo que indica menor concentración de agua, correspondiente a una cuenca alargada (da Silva *et al.* 2016).

3.2.6 El factor de forma (Ff)

Este parámetro fue definido por Horton y hace referencia a la geometría expresada de la relación del ancho promedio de la cuenca y su longitud. El resultado de este puede influir en el comportamiento de la hidrología de la cuenca y la tendencia para eventos de precipitación mayores o menores (Schmitt1 y Moreira 2015). El índice de forma para la microcuenca Quebrada Sucia se sitúa entre valores bajos (0.23), lo cual advierte una forma alargada (Nobre *et al.* 2020).

3.2.7 Densidad de drenaje

La densidad de drenaje (Dd) se define como la longitud total de los cauces por unidad de área de una cuenca hidrográfica. El valor de este puede reflejar el tipo de escorrentía superficial y la respuesta de la cuenca ante precipitaciones (Panda *et al.* 2019).

Según la caracterización morfométrica, la microcuenca tiene una densidad media de drenajes de 1.11 por unidad de área; a esto se puede atribuir que la velocidad de la escorrentía en esta microcuenca tiende a ser más rápida en comparación con una densidad baja de drenaje, debido a que el agua tiene más opciones para fluir hacia abajo a través de pendientes o desniveles según la topografía del área en estudio. También se puede atribuir a que existe una capacidad adicional para manejar y transportar el flujo de agua, lo cual, en consecuencia, disminuye la posibilidad de que se presenten inundaciones.

3.2.8 Jerarquía de la red fluvial (orden de corrientes)

Hidrográficamente, la microcuenca cuenta con un río secundario de flujo intermitente (Inalí) y cuenta con una red fluvial de orden 3.

3.2.9 Perfil altimétrico del cauce

La Figura 14 muestra las diferentes altitudes del cauce principal de la microcuenca Quebrada Sucia a lo largo del recorrido del río hasta su desembocadura. Se observa que el río tiene un perfil longitudinal cóncavo, por lo cual se infiere que la pendiente del río disminuye a medida que se acerca a su punto de aforo (Ibáñez *et al.* 2010).

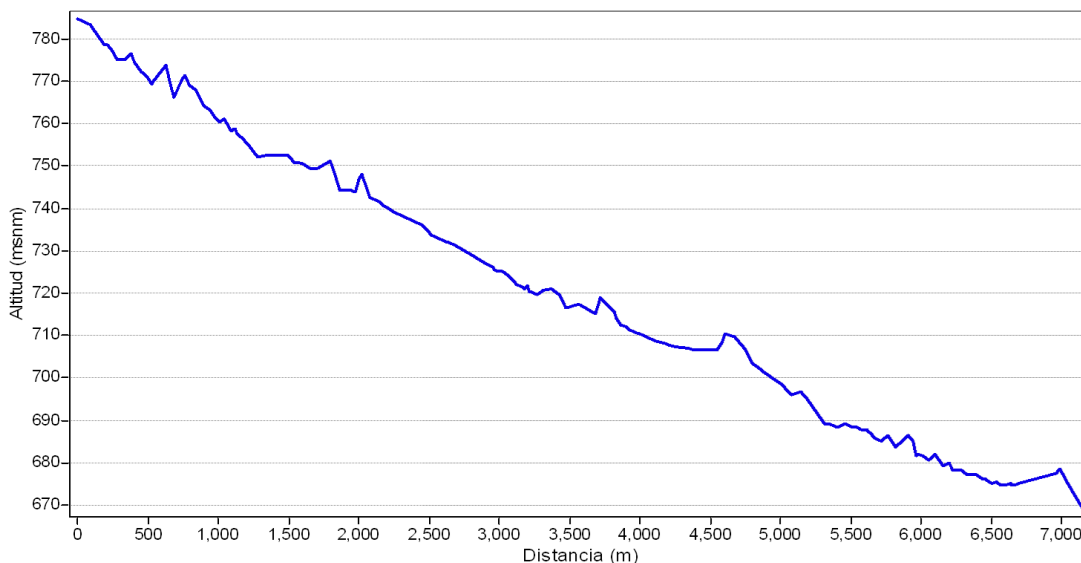


Figura 14. Perfil altimétrico del cauce principal de la microcuenca Quebrada Sucia, Nicaragua, 2023

3.2.10 Curva hipsométrica

Según USAID y CATIE (2016), la curva hipsométrica es una representación gráfica que muestra la distribución de altitudes en una zona geográfica determinada, especialmente en áreas montañosas. Esta herramienta resulta útil para comprender cómo influye la topografía en procesos hidrológicos, como el escurrimiento del agua y otros elementos relacionados con el régimen hídrico. En resumen, la curva hipsométrica permite visualizar de forma clara y concisa la elevación media del terreno y su vínculo con diversos fenómenos naturales.

La curva hipsométrica representa la etapa de desarrollo geomorfológico de la cuenca y se realiza a través del análisis del modelo de elevación digital y la comprensión de sus diferentes niveles altitudinales. En este sentido, en la Figura 15, se observa una curva hipsométrica para la microcuenca en estudio, en equilibrio. Según Harlin (1984), este tipo de curva representa a un río viejo que, a medida que envejece, tiende a seguir un curso del cauce, más estable y establecido. Por ende, tiende a tener una pendiente más suave en comparación con los ríos más jóvenes. Con el paso del tiempo, la erosión y el transporte de sedimentos suelen disminuir, lo que resulta en una disminución gradual de la pendiente del río.

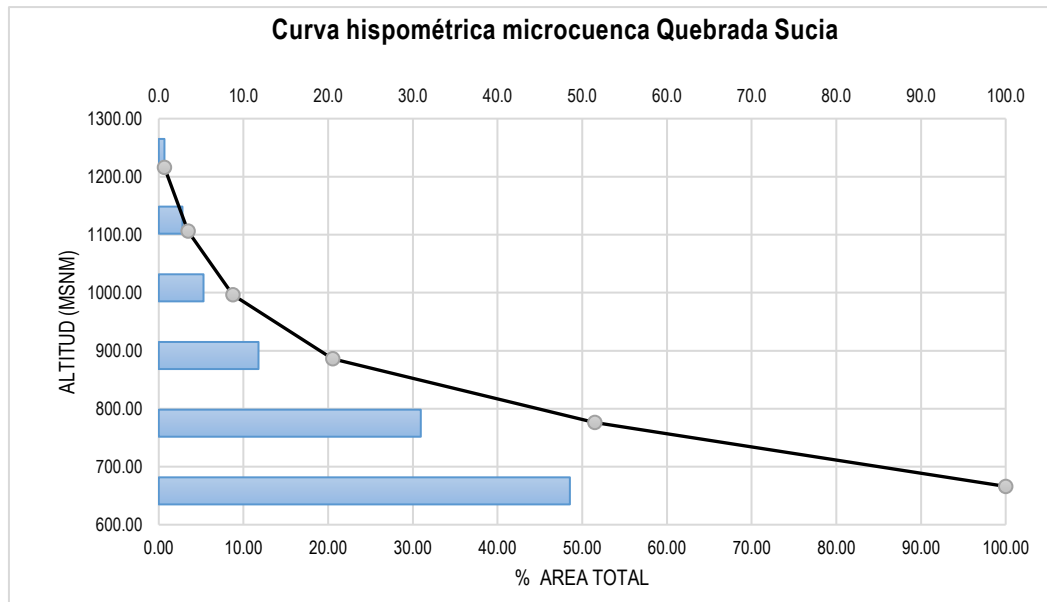


Figura 15. Curva hipsométrica de la microcuenca Quebrada Sucia, Nicaragua, 2023

3.2 Simulación base de balance hídrico a nivel de cuenca sin la intervención de obras de cosecha de agua por escorrentía de tipo reservorio

Todos los componentes del balance hídrico se muestran en la Figura 16. La simulación hidrológica representa promedios anuales del periodo (2001-2019). La precipitación a nivel de la cuenca es de 1192.8 mm, la evapotranspiración real es de 722.7 mm respectivamente, variables como la percolación al acuífero poco profundo, demuestra en promedio 157.14 mm y la recarga a acuífero profundo 7.85 mm. SWAT dividió el área de interés en 94 unidades hidrológicas (subcuencas) y un total de 1 414 unidades de respuesta hidrológica (HRUs).

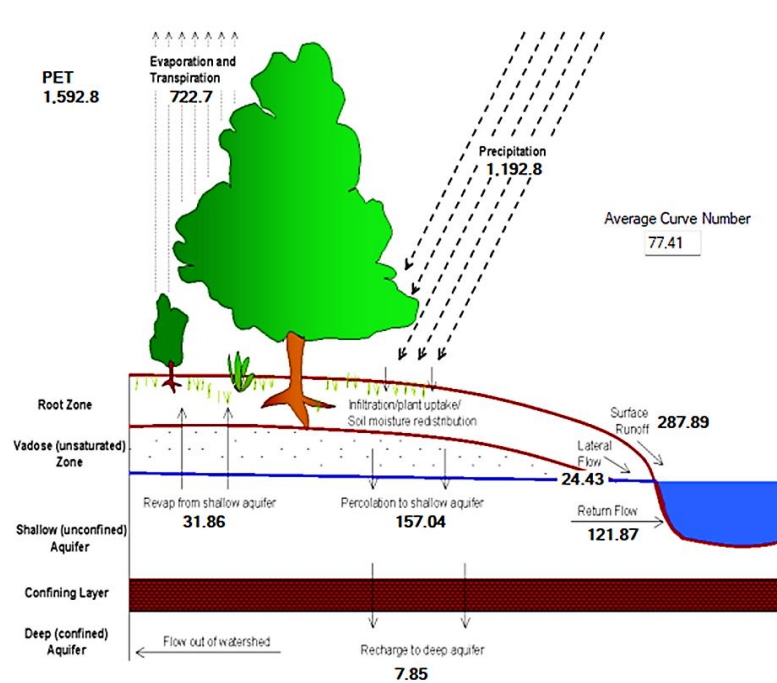


Figura 16. Representación de balance hídrico en la microcuenca Quebrada Sucia. Los valores son medias anuales en mm. En el esquema, se visualizan datos de evaporación, precipitación, flujo de retorno, recarga hídrica, escorrentía y producción de agua.

3.3 Comportamiento de variables hidrológicas a partir de escenarios de balance hídrico sobre la microcuenca Quebrada Sucia

Cuadro 8. Resumen del porcentaje de cambio de las variables hidrológicas del balance hídrico a nivel de microcuenca por escenarios de intervención de OCAS durante el periodo de simulación 2001-2019

Escenarios	GW mm	%Cambio	SW mm	%Cambio	PERC mm	%Cambio
Línea base o escenario de referencia	11 811.6	0	12 8615.4	0	15 555.5	0
Escenario 1 OCAS	12 240.5	4	12 8615.4	0	15 555.5	0
Escenario 2 Incremento del 25 %	13 503.3	10.3	14 8200.5	15	16 893.7	9
Escenario 3 Incremento del 50 %	16 554.5	23	17 0572.8	15	20 210.5	20

Donde: GW mm: escorrentía del agua subterránea, SW mm: contenido de agua en el suelo, PERC mm: percolación

3.3.1 Comportamiento hidrológico del agua subterránea

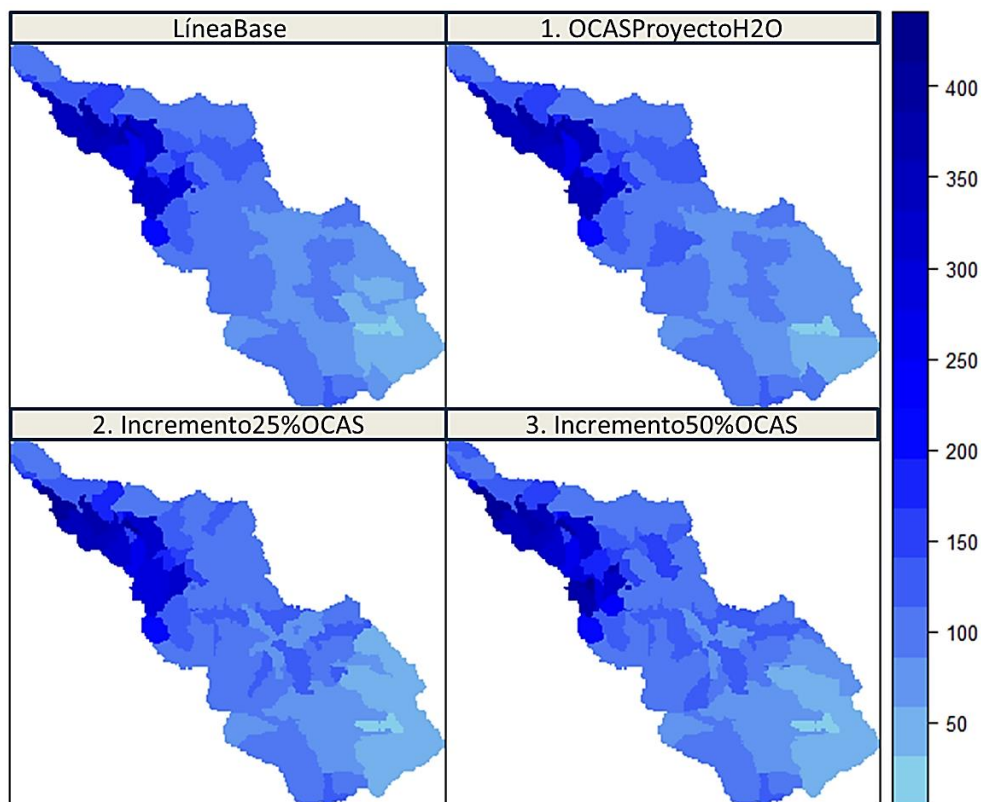


Figura 17 Comparación de los escenarios hidrológicos que exploran el comportamiento espacial del agua subterránea según el grado de intervención de las obras de cosecha de agua (OCAS) en la microcuenca Quebrada Sucia. Los valores en la leyenda se representan en milímetros.

La escorrentía subterránea es el flujo de agua que se desplaza a través del suelo hacia los acuíferos subterráneos. En el contexto de la modelación hidrológica, SWAT considera la interacción entre el suelo y el agua subterránea para estimar la cantidad de agua que contribuye a los acuíferos a través de la infiltración del agua subterránea.

En la simulación base, que no incluyó ninguna intervención de obras de cosecha de agua, se obtuvo un valor promedio anual que osciló entre los 30 y 404 mm/año, con una media de 125.65 mm/año de escorrentía subterránea y un total de 11 811.6 mm durante el periodo de simulación (2001-2019). Esto representa la cantidad de agua que se infiltró en el suelo y contribuyó directamente al acuífero.

Posteriormente, se implementaron obras de cosecha de agua en el territorio, lo cual resultó en un incremento del 4 % (Cuadro 8) en el aporte de agua subterránea. Lo anterior puede indicar que las obras de cosecha de agua favorecen la captura de una cantidad adicional de agua para redirigirla hacia los acuíferos, aumentando así el almacenamiento subterráneo.

En el escenario 2, se observó un incremento de hasta un 10.3 % en el aporte de agua subterránea después de la implementación de las obras de cosecha de agua adicionales. Por consiguiente, los

resultados pueden sugerir que las nuevas obras alcanzaron un impacto aún mayor en la captura de agua subterránea.

Finalmente, en el escenario 3, se evidencia un aumento de hasta un 23 % en el aporte de agua subterránea. Esto puede atribuirse a que las obras de cosecha de agua adicionales implementadas en este escenario tuvieron el mayor impacto en el almacenamiento de agua subterránea en comparación con los escenarios previos (línea base, 1 y 2).

3.2.2 Comportamiento hidrológico del contenido de agua en el suelo

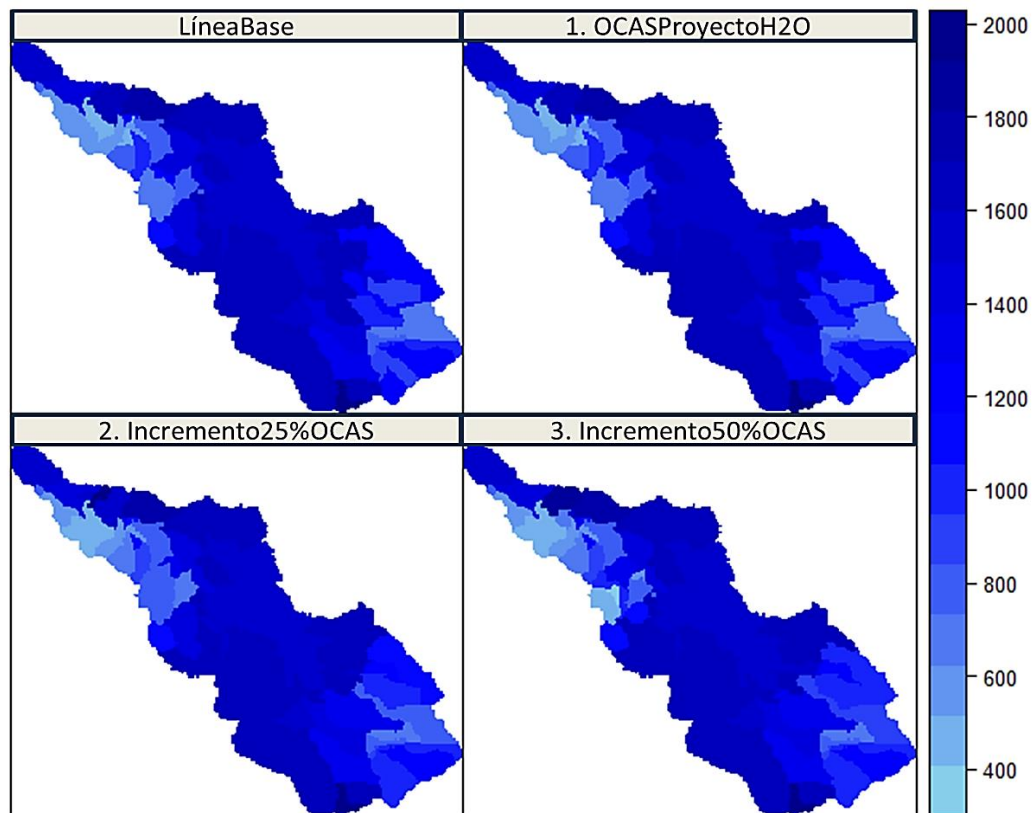


Figura 18 Comparación de los escenarios hidrológicos que exploran el comportamiento espacial del contenido de agua en el suelo según el grado de intervención de las obras de cosecha de agua (OCAS) en la microcuenca Quebrada Sucia. Los valores en la leyenda se representan en milímetros.

El contenido de agua en el suelo es una medida utilizada para comprender el nivel de humedad del suelo en diferentes momentos durante el período de simulación. Se calcula teniendo en cuenta los flujos de entrada, como la precipitación, y los flujos de salida, como la evaporación y la escorrentía.

En la simulación base, se obtuvo un promedio anual que osciló entre 421 y 1 920 mm/año de contenido de agua en el suelo con una media de 1 368.24 mm/año, durante el periodo de simulación (2001-2019). Esto indica la cantidad de agua presente en el suelo después de considerar los flujos de entrada y salida durante el período simulado.

En el escenario 2, que involucró la intervención con obras de cosecha de agua, por parte del Proyecto cosecha de agua, no se observó ningún cambio significativo en el aporte o disminución de la humedad del suelo. Esto sugiere que las obras de cosecha de agua implementadas en ese

escenario a partir del análisis del modelo de la SWAT no tuvieron un impacto notable en la humedad del suelo.

Sin embargo, en los escenarios 2 y 3, donde se incrementó el número de obras de cosecha de agua en un 25 % y 50 % sobre la microcuenca, se observa un aumento de al menos el 15 % en el aporte a la humedad del suelo (Cuadro 8). Esto indica que un mayor número de obras de cosecha de agua tuvo un impacto positivo en la retención de agua en el suelo, lo que resultó en un aumento en la humedad del suelo.

3.3.3 Comportamiento hidrológico de la percolación

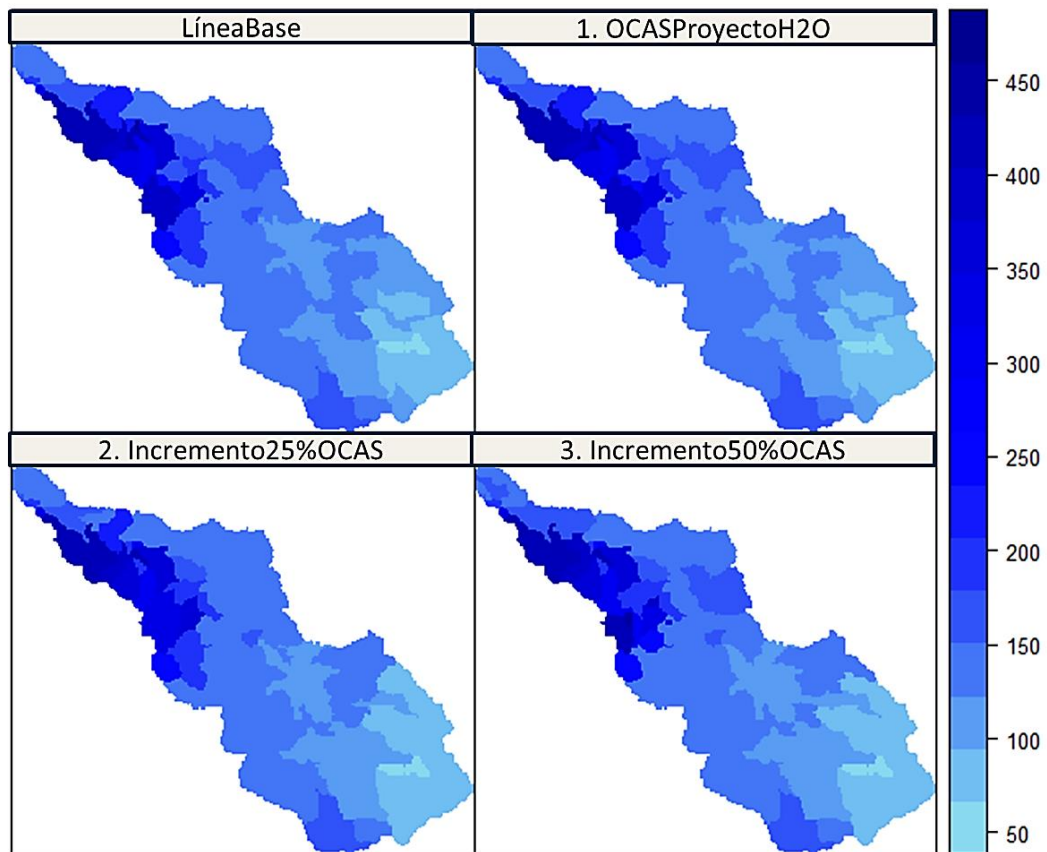


Figura 19 Comparación de los escenarios hidrológicos que exploran el comportamiento espacial de la percolación según el grado de intervención de las obras de cosecha de agua (OCAS) en la microcuenca Quebrada Sucia. Los valores en la leyenda se representan en milímetros.

Estos resultados destacan la importancia de las obras de cosecha de agua en la regulación del contenido de agua en el suelo. Un mayor número de obras de cosecha de agua ayudaría a retener más agua en el suelo, lo que tendría beneficios significativos para la disponibilidad de agua en la cuenca y el mantenimiento de una adecuada humedad del suelo.

Durante el período de simulación (2001-2019), se observó una variación en la percolación promedio anual, que osciló entre 94 y 65 mm/año, con una media de 165.48 mm/año. La percolación se refiere al proceso de infiltración y movimiento del agua a través del suelo hacia capas más profundas.

En el escenario 2, el cual involucró la intervención de las obras de cosecha de agua ya construidas en la microcuenca, no se identificó ningún cambio significativo en la percolación, en

comparación con la línea base (figura A, que asume a la microcuenca sin OCAS) y el escenario actual, generado con la integración al modelo, de las 14 OCAS existentes actualmente construidas por el Proyecto Cosecha de Agua, en el territorio. El resultado de este escenario revela que las obras de cosecha de agua existentes no impactaron de manera notable en la cantidad de agua que se infiltró en el suelo.

En comparación con el escenario 2 (14 OCAS existentes), el escenario 3, en el que se implementó un incremento del 25 % de nuevas obras de cosecha de agua, reveló como resultado un cambio de hasta un 9 % de aporte a la percolación (Cuadro 8). A lo cual se infiere que un aumento del número de obras de cosecha de agua en la microcuenca posee un efecto positivo en la infiltración de agua en el suelo.

En el escenario 4, que implicó un aumento del 50 % en el número total de sitios adecuados para la construcción de nuevos reservorios en la microcuenca, se registró un incremento de hasta un 20 % (Cuadro 8) en la contribución a la percolación. Esto sugiere que la construcción de nuevos reservorios tiene un impacto significativo en la cantidad de agua que se infiltró en el suelo de la microcuenca.

4. Discusión

El análisis de la simulación base del balance hídrico realizado mediante el modelo de la SWAT, sin la intervención de obras de cosecha de agua, proporcionó una comprensión integral del comportamiento de las variables hidrológicas que describen la dinámica del agua a nivel de cuenca. Los resultados detallados de este estudio se encuentran descritos en la sección 3.3 del documento.

Estudios como el de Gupta *et al.* (2020) destacan que el análisis del balance hídrico utilizando el modelo de la SWAT brinda una sólida base para futuras investigaciones asociadas con los recursos hídricos. Asimismo, Kelaiya y Rank (2019) mencionan que este tipo de estudios brindan resultados útiles para desarrollar una comprensión general de cómo funcionan los sistemas hídricos y qué cambios ocurren en función del período analizado.

A partir de esta simulación base, se compararon tres variables de interés: agua subterránea, humedad del suelo y percolación, las cuales forman parte de los componentes generales del balance hídrico. Los escenarios creados que incluyeron la intervención de obras de cosecha de agua facilitaron evaluar el impacto de las obras de cosecha en dichas variables, al suministrar información relevante sobre cómo podrían influir en el comportamiento hidrológico de la cuenca.

Un resultado crucial del estudio fue la evaluación del comportamiento espacial del agua subterránea y percolación en la microcuenca. Se analizaron las obras de cosecha de agua existentes, construidas por el Proyecto Cosecha de Agua, y se observó un impacto positivo en la recarga hídrica y el almacenamiento subterráneo. Estas obras demostraron contribuir de manera efectiva a la disponibilidad de agua subterránea en la zona. El resultado concuerda con el de Guerra R (2022) en su estudio a través de isotopos estables, donde indica que las obras de cosecha de agua contribuyen en al menos un 1.7 % al agua subterránea.

A medida que se incorporaron al modelo de la SWAT más obras de cosecha de agua (con un aumento de un 25 % y un 50 % su número), se advirtió un incremento gradual en la aportación de agua subterránea. Dicho aumento progresivo es fundamental, ya que podría generar beneficios significativos para la disponibilidad general de agua en el área de estudio.

Un estudio de Fowe *et al.* (2015) resalta que los pequeños reservorios juegan un papel crucial en la sostenibilidad de las aguas subterráneas. Además, señala que al menos el 30 % del agua retenida por estos reservorios se infiltra, lo cual resulta beneficioso para la recarga de los acuíferos.

En cuanto al aumento de la humedad del suelo, resultó que un incremento de los reservorios (escenario 2 y 3) tiene un impacto positivo en la retención de agua del suelo. Machiwal *et al.* (2017) enfatiza que el aporte de los reservorios a la humedad del suelo tiene beneficios significativos para la vegetación y la agricultura, ya que proporciona un suministro constante de agua para las plantas y ayuda a mitigar los efectos de la sequía.

Estudios similares, como el llevado a cabo por Rabelo *et al.* (2021), destaca cómo la implementación de una red de pequeños reservorios en el modelo de la SWAT reflejan un impacto significativo en los recursos hídricos. Aunque la retención de agua promedio es baja (un 2 %), estos reservorios logran reducir el flujo de agua en los ríos principales, lo cual a su vez afecta los volúmenes disponibles.

Los resultados obtenidos en este estudio se refieren a aspectos hidrológicos específicos de una cuenca en el corredor seco de Nicaragua; no obstante, la metodología utilizada para evaluar el impacto de las obras de cosecha de agua y la discusión de diferentes procesos hidrológicos, como el comportamiento del agua subterránea, la percolación y la humedad del suelo, pueden ser aplicados a cuencas con características climáticas, hidrológicas y de uso de la tierra similares.

5. Conclusión

1. Los resultados previos revelaron que el desarrollo de escenarios de aumento de las obras de cosecha de agua tiene un impacto positivo en variables hidrológicas que intervienen en el balance hídrico a nivel de cuenca (agua subterránea, la humedad del suelo y la percolación).
2. Los resultados del escenario 1, que involucra la intervención de las obras de cosecha de agua existentes, mostraron un cambio significativo de al menos un 4 % en la contribución del agua subterránea sobre la microcuenca.
3. El estudio demostró que el escenario 3, que implica una intervención del 50 % de las obras de cosecha de agua, resultó en una contribución notablemente mayor de agua subterránea en la microcuenca, con un aumento de hasta un 22 %, en comparación con los escenarios anteriores. Lo anterior sugirió que el aumento de la cantidad de obras de cosecha de agua tiende a ser beneficioso a la recarga de los acuíferos y, por lo tanto, en la disponibilidad de agua a largo plazo.
4. Los hallazgos de este estudio resaltan la utilidad de implementar y mantener obras de cosecha de agua en áreas de estudio similares. Además, subrayan la relevancia de considerar estrategias de gestión sostenible del agua, como la construcción de reservorios, para garantizar una mayor recarga de los acuíferos y una mejor gestión de los recursos hídricos en general. Estas medidas son fundamentales para asegurar una disponibilidad

adecuada de agua y una gestión eficiente de este recurso vital en el contexto de cambio climático.

6. Recomendaciones

1. Conviene generar información detallada en campo de evaporación e infiltración en la base de las obras de cosecha de agua, así como tomar registros periódicos de variables climáticas a escala local para realizar ajuste y calibraciones al modelo en futuras investigaciones, junto con la comparación de datos simulados versus observados, puede mejorar en gran medida la precisión del modelo.
2. Resulta oportuno realizar investigaciones futuras que incorporen una metodología para agregar obras de cosecha de agua a la herramienta del suelo y agua de la SWAT.
3. Precisa ofrecer análisis concretos de balance hídrico a nivel de reservorio y realizar monitoreos periódicos de estos, con el fin de mejorar y preservar el buen funcionamiento de las obras de cosecha de agua por escorrentía.

7. Referencias bibliográficas

- Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, 2016. Diagnóstico de la subcuenca del río Shullcas (en línea, sitio web). Disponible en https://pdf.usaid.gov/pdf_docs/PA00MTGP.pdf.
- Programa Mundial de Alimentos, 2018. Evaluación inicial de seguridad alimentaria en emergencia Nicaragua. pág 31.
- Arnol, J; Neitsch, S; Kiniry, J; Williams, J; King, K. 2002. Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation. Texas, EEUU, Texas Water Resources Institute, College Station. 4004 p.
- Arnold, JG; Srinivasan, R; Muttiah, RS; Williams2, JR. 1998. Large Area Hydrologic Modeling and Assessment Part I: Model Development'. Journal of the American Water Resources Association 34(1):73-89. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x>.
- Arroyo, L; Heidinger, H; Araya, E. 2010. Modelo Hidrológico SWAT como herramienta para procesos de toma de decisión. Documento Técnico N14. Area Evaluación de Tierras. San José, Costa Rica, s.e. p. 31.
- Barnett, TP; Pierce, DW. 2009. Sustainable water deliveries from the Colorado River in a changing climate. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 106(18):7334-7338. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.0812762106>.
- Behrends, F; Chagas, C; Vázquez, A; Massobrio, Palacin, A; Santana, O; Castiglion, M; Massobrio, M. 2011. Aplicación del modelo hidrológico-swat-en una microcuenca agrícola de la pampa ondulada (en línea). Suelo 29(1):75-82. Disponible en http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1850-20672011000100008.
- Bendaña, G. 2018. Breve Caracterización de la situación Agropecuaria e Hidrológica del Norte del Corredor Seco de Nicaragua. Revista de Temas Nicaragüenses .
- Briak, H; Moussadek, R; Aboumaria, K; Mrabet, R. 2016. Assessing sediment yield in Kalaya gauged watershed (Northern Morocco) using GIS and SWAT model (en línea). International Soil and Water Conservation Research 4(3):177-185. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2016.08.002>
- Dhami, B; Himanshu, SK; Pandey, A; Gautam, AK. 2018. Evaluation of the SWAT model for water balance study of a mountainous snowfed river basin of Nepal (en línea). Environmental Earth Sciences 77(1). DOI: <https://doi.org/10.1007/s12665-017-7210-8>.
- Dile, Y; Srinivasan, R; Chris, G. 2019. QGIS Interface for SWAT (QSWAT) version 1.8: QSWAT+ Step by Step Setup for the Robit Watershed, Lake Tana basin Ethiopia. s.l., s.e. 118 p.
- Fernandez, C. 2016. Asimilación y evaluación de datos de precipitación en base a satélite en el modelamiento hidrológico de la cuenca del Río Vilcanota. Lima, Peru, Senamhi (Servicio Nacional de Metereologia e Hidrologia del Peru). 61 p.
- Fowe, T; Karambiri, H; Paturel, JE; Poussin, JC; Cecchi, P. 2015. Water balance of small

reservoirs in the volta basin: A case study of boura reservoir in burkina faso (en línea). *Agricultural Water Management* 152:99-109. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.01.006>.

- Fuentes, JDJ. 2004. Análisis morfométrico de cuencas: Caso de estudio del Parque Nacional Pico de Tancítaro. (en línea). Instituto Nacional de Ecología :1-47. Disponible en http://www.inecc.gob.mx/descargas/cuencas/morfometria_pico_tancitaro.pdf.
- Gamboa, E. 2018. Producción de agua y sedimento actual y futuro a partir de cambios de cobertura forestal, Sector Prusia, Parque Nacional. s.l., Tecnológico de Costa Rica. 65 p. Gaspari, F; Rodríguez, A; Senisterra, G; Denegri, G; Delgado, I; Besteiro, S. 2012. Caracterización morfométrica de la cuenca alta del río Sauce Grande, Buenos Aires, Argentina. 7mo Congreso de Medio Ambiente :1-25.
- Guerra R, CM. 2022. Contribución de obras de cosecha de agua a la recarga acuífera en la subcuenca Aguas Calientes, Somoto, Nicaragua. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (8.5.2017):2003-2005.
- Gupta, A; Himanshu, SK; Gupta, S; Singh, R. 2020. Evaluation of the SWAT Model for Analysing the Water Balance Components for the Upper Sabarmati Basin (en línea). s.l., Springer Singapore, vol.39. 141-151 p. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-13-8181-2_11.
- Hargreaves, GL; Hargreaves, GH; Riley, JP. 1985. Agricultural Benefits for Senegal River Basin. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 111(2):113-124. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9437\(1985\)111:2\(113\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9437(1985)111:2(113)).
- Harlin, JM. 1984. Watershed morphometry and time to hydrograph peak. *Journal of Hydrology* 67(1-4):141-154. DOI: [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(84\)90238-5](https://doi.org/10.1016/0022-1694(84)90238-5).
- Hosseini, SH; Khaleghi, MR. 2020. Application of SWAT model and SWAT-CUP software in simulation and analysis of sediment uncertainty in arid and semi-arid watersheds (case study: the Zoshk–Abardeh watershed) (en línea). *Modeling Earth Systems and Environment* 6(4):2003-2013. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40808-020-00846-2>.
- Humphreys, L. 1991. Tropical pasture utilization. Cambridge, UK, Cambridge University Press. 202 p
- Ibáñez, S; Moreno, H; Gisbert, J. 2010. Morfología de las cuencas hidrográficas. Universidad Politécnica de Valencia :12.
- Jodar-Abellan, A; Ruiz, M; Melgarejo, J. 2018. Evaluación del impacto del cambio climático sobre una cuenca hidrológica en régimen natural (SE, España) usando un modelo SWAT. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 35(3):240-253. DOI: <https://doi.org/10.22201/cgeo.20072902e.2018.3.564>.
- Kelaiya, J; Rank, PH. 2019. Assessment of Water Balance Components of Bhadar River Basin Using SWAT Model. *International Journal of Bio-resource and Stress Management* 10(2):181-184. DOI: <https://doi.org/10.23910/ijbsm/2019.10.2.1974>.
- Kundzewicz, ZW; Mata, LJ; Arnell, NW; DÖLL, P; Jimenez, B; Miller, K; Oki, T; ŞEN, Z; Shiklomanov, I. 2008. The implications of projected climate change for freshwater resources and their management. *Hydrological Sciences Journal* 53(1):3-10. DOI:

<https://doi.org/10.1623/hysj.53.1.3>.

- Machiwal, D; Dayal, D; Kumar, S. 2017. Estimating Water Balance of Small Reservoirs in Arid Regions: A Case Study from Kachchh, India. *Agricultural Research* 6(1):57-65. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40003-016-0243-5>.
- Maldonado, R; Vidal, S. 2018. Uso eficiente del agua de riego en el Parque Tunari, Bolivia (en línea). *Leisa, revista de agroecología* 34:7. Disponible en www.leisa-al.org.
- Moore, ID; Grayson, RB; Ladson, AR. 1991. Digital terrain modelling: A review of hydrological, geomorphological, and biological applications. *Hydrological Processes* 5(1):3-30. DOI: <https://doi.org/10.1002/hyp.3360050103>.
- Nachtergaele, F; Velthuisen, H; Verelst, L; Wiberg, D. 2012. Harmonized World Soil Database Version 1.2. :50.
- Nachtergaele, F; Velthuisen, H; Verelst, L; Wiberg, D. 2012. Harmonized World Soil Database Version 1.2. Batjes, N; Dijkshoorn, K; Engelen, V; Fischer, G; Jones, A; Montanarella, L; 40 Petri, M; Prieler, S; Texeira, E; Dhi, X (ed.). Roma, Italia, FAO (organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). p. 50.
- Neitsch, SL; Arnold, JG; Kiniry, JR; Srinivasan, R; Williams, JR. 2002. Soil and Water Assessment Tool User's Manual (en línea). TWRI Report TR-192 :412. Disponible en <http://swat.tamu.edu/media/1294/swatuserman.pdf>.
- Nobre, NC; Da Silva, CM; Santana, JS; Da Silva, WA. 2020. Caracterização morfométrica, climática e de uso do solo da Bacia hidrográfica do rio Farinha-MA. *Acta Iguazu* 9(1):11-34. DOI: <https://doi.org/10.48075/actaiguaz.v9i1.19021>.
- Núñez S. 1981. Fundamentos de edafología. San José, Costa Rica, EUNED. 216 p.
- Panda, B; Venkatesh, M; Kumar, B; Anshumali. 2019. A GIS-based Approach in Drainage and Morphometric Analysis of Ken River Basin and Sub-basins, Central India. *Journal of the Geological Society of India* 93(1):75-84. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12594-019-1125-9>.
- Pusineri, G; Pedraza, R; Lozeco, C. 2005. Uso de modelos digitales de elevación y de sistemas de información geográfica en la modelación hidrológica. *Geográfica digital*:8. DOI: <https://doi.org/10.30972/geo.232664>
- Rabelo, UP; Dietrich, J; Costa, AC; Simshäuser, MN; Scholz, FE; Nguyen, VT; Lima Neto, IE. 2021. Representing a dense network of ponds and reservoirs in a semi-distributed dryland catchment model. *Journal of Hydrology* 603(October). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.127103>.
- Ríos, N; Benegas, L. (s. f.). Herramienta Geoespacial para la identificación y selección de sitios potenciales para construcción de obras de Cosecha de Agua de escorrentía en el Corredor Seco Centroamericano. Turrialba, Costa Rica, s.e.
- Ríos, N; Cárdenas, A; Andrade, H. 2007. Escorrentía superficial e infiltración en sistemas ganaderos convencionales y silvopastoriles en Matiguas, Nicaragua y Esparza, Costa Rica (en línea). informe Final Proyecto GEF - SSP 2003 -2007 :71. Disponible en https://repositorio.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/7739/Escorrentia_superficial.pdf?sequence=2&isAllowed=y.

- Saxton, K.2002. SPAW (Soil-Plant-Atmosphere-Water). user manual, field hydrology processes. Washington State University. 39.p
- Schmitt1, A; Moreira, CR. 2015. Manejo e gestão de bacia hidrográfica utilizando o software gratuito Quantum-GIS (en línea). Cultivando Saber 151:10-17. Disponible en <https://cultivandosaber.fag.edu.br/index.php/cultivando/article/view/684>.
- da Silva, AR; da Silva, MF; dos Santos, LCA. 2016. Caracterização morfométrica da bacia hidrográfica do rio Itacaiúnas-PA. Percurso 2(2):12. DOI: <https://doi.org/10.4025/percurso.v6i2.24262>.
- Uribe, N. 2010. SWAT (Soil and Water Assessment Tool): Conceptos básicos y guía rápida para el usuario (en línea). s.l., s.e. 1-47 p. Disponible en <https://swat.tamu.edu/media/46967/swat2005-tutorial-spanish.pdf>.
- van der Zee, A; van der Zee, J; Meyrat, A; Poveda, C; Picado, L. 2012. Estudio de caracterización del corredor seco Centroamericano (en línea). FAO :92. Disponible en https://reliefweb.int/sites/reliefweb.int/files/resources/tomo_i_corredor_seco.pdf.

8. Anexos

Anexo 1. Cuadro de parámetros del suelo para useroil en el modelo SWAT

Parámetros	Descripción
SOL ZMX	Máxima profundidad del perfil del suelo con presencia de raíces (mm)
ANION EXCL	Fracción de porosidad desde donde los aniones son excluidos
SOL CRK	Fracción del volumen de rompimiento potencial o máximo del perfil del suelo
SOL Z	Profundidad desde la superficie del suelo hasta el fondo del horizonte (mm)
SOL BD	Densidad real (Mg/m ³ OR g/cm ³)
SOL AWC	Capacidad de disponibilidad del agua del horizonte de suelo (mm H ₂ O/mm soil)
SOL K	Conductividad hidráulica saturada (mm/hr)
SOL CBN	Contenido de carbono orgánico (% del peso del suelo)
SOL ALB	Albedo del suelo húmedo
SOL EC	Conductividad eléctrica (dS m)
USLE K	Factor USLE de erodabilidad del suelo
CLAY	Contenido de arcilla (% del peso del suelo)
SILT	Contenido de limo (% del peso del suelo)
SAND	Contenido de arena (% del peso del suelo)
ROCK	Contenido de fragmentos de roca (% del peso del suelo)

Fuente: Winchell et al. (2008)

Anexo 2. Parámetros morfométricos asociados a La Forma Del Relieve

Parámetro	Símbolo	Valor	OBS
Cota máxima (msnm)	cmax	1326.00	
Cota mínima (msnm)	cmin	666.00	
Altitud media (msnm)	Am	814.07	
Altitud frecuente (msnm)	Af	48.54	
Altitud mayor del cauce	Amc	878.00	
Altitud menor del cauce	Amec	671.00	
Pendiente promedio de la cuenca (%)	Smed	9.22	Relieve mediano

Adaptado de Ney Ríos

Anexo 3 Parámetros de clima requeridos por SWAT

Parámetros	Descripción
TMPXM	Promedio/mes de la temperatura máxima/día (°C)
TMPMN	Promedio/mes de la temperatura mínima/día (°C)
TPMSTDMX	Desviación estándar/ mes de la temperatura máxima/día (°C)
TPMSTDMN	Desviación estándar/mes de la temperatura mínima/día (°C)
PCPMM	Promedio/mes de la precipitación/día (mm H ₂ O)
PCPSKW	Coefficiente de asimetría/mes de la precipitación/día
PR_W1	Probabilidad/mes de ocurrencia de 1 día húmedo luego de 1 día seco
PR_W2	Probabilidad de ocurrencia de 1 día húmedo luego de 1 día húmedo
PCPD	Promedio/mes del número de días de lluvia
RAINHHMX	Máxima lluvia de media hora/mes (mm H ₂ O)
SOLARAV	Promedio/mes de la radiación solar (MJ/m ² /día)
DEWPT	Promedio/mes de la temperatura del punto de rocío (MJ/m ² /día)
WNDV	Promedio/mes de la velocidad del viento (m/s)

Fuente: Arroyo (2010)