

Análisis de Usabilidad del Módulo de Producción Hídrica de InVEST como Herramienta de
Planificación de una Cuenca Estratégica de los Andes Colombianos

Daniela Sofía Arenas González y Oscar Sneyder Ordóñez Peñuela

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Civil

Director

Sandra Rocío Villamizar Amaya

Ingeniero Civil, Ph.D. en Sistemas Ambientales

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Ingeniería Civil

Bucaramanga

2022

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	10
1. Objetivos	12
1.1. Objetivo general	12
1.2. Objetivos específicos.....	12
2. Estado del arte del arte del modelo de producción hídrica con InVEST	13
2.1. Modelación hidrológica, producción hídrica e InVEST	13
2.2. Estudios de evaluación de la producción hídrica con InVEST	15
3. Metodología	19
3.1. Descripción general del sitio de estudio.....	19
3.2. Modelo InVEST para la producción hídrica anual.....	21
3.3. Descripción y procesamiento de los insumos del modelo.....	23
3.3.1. Cuencas y subcuencas	23
3.3.2. Precipitación anual promedio.....	24
3.3.3. Evapotranspiración (ET) de referencia media anual	26
3.3.4. Profundidad efectiva del suelo	27
3.3.5. Contenido de agua disponible para las plantas (PAWC)	28
3.3.6. Uso y cobertura de suelo	30
3.3.7. Tabla biofísica	31
3.3.7.1 lucode.....	31
3.3.7.2 LULC_desc.....	31
3.3.7.3 LULC_veg.....	32
3.3.7.4 root_depth.....	32

3.3.7.5	Kc.....	33
3.3.8.	Parámetro Z.....	34
3.4.	Modelamiento inicial, análisis de sensibilidad y calibración del modelo.....	35
3.4.1.	Corrida inicial del modelo InVEST.....	35
3.4.2.	Análisis de sensibilidad de los parámetros.....	39
3.4.2.1	Sensibilidad de Profundidad de raíz (Root Depth).....	40
3.4.2.2	Sensibilidad del parámetro Z.....	40
3.4.2.3	Sensibilidad del parámetro Kc.....	40
3.4.2.4	Sensibilidad de la ET ₀	41
3.4.3.	Calibración.....	42
3.5.	Modelamiento de la producción hídrica ante condiciones futuras de uso de suelo y demanda.....	44
4.	Resultados.....	47
4.1.	Análisis de sensibilidad y calibración.....	47
4.2.	Escenarios de uso de suelo y demanda.....	47
5.	Discusión.....	50
5.1.	Gestión de datos de entrada.....	50
5.2.	Análisis de sensibilidad y calibración.....	51
5.3.	Escenarios de uso de suelo y demanda.....	54
6.	Conclusiones.....	56
	Bibliografía.....	58
	Apéndice.....	67

Lista de Figuras

Figura 1. Número de artículos por país relacionados con el cálculo de producción hídrica con InVEST según la base de datos Scopus	15
Figura 2. Número de artículos por año relacionados con el cálculo de producción hídrica con InVEST según la base de datos Scopus	16
Figura 3. Modelo de elevación digital de la cuenca del río Tona y su ubicación	20
Figura 4. Hidrografía de la cuenca del río Tona con sus afluentes principales, bocatomas, y ubicación gráfica del embalse	21
Figura 5. Subcuencas de la cuenca del Tona	24
Figura 6. Ráster de precipitación anual promedio en la cuenca del río Tona (panel superior) y gráfica con promedio de precipitaciones mensuales por estación en el periodo 1987-2002 (panel inferior)	25
Figura 7. Evapotranspiración anual promedio (mm) para el período 1970-2000.....	27
Figura 8. Profundidad efectiva del suelo (mm) para el período 1949-2015	28
Figura 9. Fracción promedio de contenido de agua disponible para las plantas para el período 1949-2015	29
Figura 10. Mapa de uso y cobertura de suelo de la cuenca del río Tona	31
Figura 11. Interfaz de entrada de datos del modelo anual de producción hídrica de InVEST para Tona	36
Figura 12. Producciones hídricas anuales utilizando los datos de entrada para el modelamiento inicial.....	38
Figura 13. Comparación de las producciones hídricas simuladas con ET0 promedio y ET0 anual	43

Figura 14. Valores anuales de producción hídrica ante diferentes condiciones de uso de suelo..	48
Figura 15. Producción hídrica por subcuenca en los tres escenarios de uso de suelo	49
Figura 16. Variación de la producción hídrica simulada ante cambios en la profundidad de raíz	52
Figura 17. Variación de la producción hídrica ante cambios en el parámetro Z	53
Figura 18. Variación de la producción hídrica ante los escenarios de condiciones futuras con respecto al uso de suelo actúa	54

Lista de Tablas

Tabla 1. Tipos de uso de suelo.....	30
Tabla 2. Profundidad de raíz.....	33
Tabla 3. Fuentes y referencias para la elección del coeficiente K_c	34
Tabla 4. Datos de salida correspondientes a la corrida inicial del modelo InVEST para la cuenca del río Tona.....	37
Tabla 5. Volumen de producción hídrica observada en metros cúbicos por año	38
Tabla 6. Valores de k_c obtenidos de una nueva revisión bibliográfica	41
Tabla 7. Variaciones hechas para la calibración del modelo	44
Tabla 8. Cambios de uso de suelo. Escenario concertado	45
Tabla 9. Cambios de uso de suelo. Escenario protector	46
Tabla 10. Escenarios de demanda total anual	46
Tabla 11. Error relativo porcentual de la producción hídrica simulada con respecto a la observada	47
Tabla 12. Producciones hídricas ante condiciones futuras de uso de suelo	47
Tabla 13. Producción hídrica por subcuenca para escenarios de uso de suelo	48
Tabla 14. Caudal de captación adicional máximo posible.....	49

Lista de Apéndices

Apéndice A. Tabla Biofísica.....	67
Apéndice B. Cálculo del parámetro Z.....	68
Apéndice C. Variación entre diferentes profundidades de raíz	69
Apéndice D. Producción hídrica usando datos de Kc sin ajustar (m ³)	70
Apéndice E. Producción hídrica usando datos de Kc ajustado (m ³).....	71
Apéndice F. Producción hídrica con ET0 anual (m ³)	72
Apéndice G. Valores anuales de producción hídrica ante diferentes condiciones de uso de suelo	73

Resumen

Palabras clave: Producción hídrica, InVEST, modelación hidrológica, servicios ecosistémicos.

El incremento de la demanda del recurso hídrico, por factores como el crecimiento poblacional y actividades antrópicas, se ha convertido en una de las principales causas del estrés hídrico. Se requiere entonces implementar estrategias de cuantificación del recurso hídrico que permitan tomar decisiones de manejo del recurso. Este trabajo evaluó la aplicabilidad de InVEST, una herramienta para el análisis de servicios ecosistémicos, para estimar la producción hídrica anual en una cuenca estratégica de los Andes colombianos, a partir de datos globales y locales disponibles. El análisis de sensibilidad encontró que los parámetros más relevantes están relacionados con la precipitación y la evapotranspiración (parámetros Z y K_c) y se logró una calibración aceptable del modelo (error relativo porcentual de 1,18%). Debido a que la precisión del modelo es dependiente de los datos de entrada, se evidenció la importancia de llevar a cabo estudios de investigación a nivel local que permitan caracterizar adecuadamente las condiciones climáticas y biofísicas de la cuenca, siendo necesario analizar principalmente los parámetros de mayor incertidumbre (K_c , ET_0 y profundidad de raíz). El modelo calibrado sirvió para evaluar la producción hídrica para condiciones futuras de uso y cobertura del suelo y demanda. Aunque no se evidenciaron grandes cambios en la producción hídrica por cambios en el uso y cobertura del suelo, sí se identificó un posible desabastecimiento para el escenario de demanda máxima.

Abstract

Keywords: Water yield, InVEST, hydrological modelling, ecosystem services.

The increase in the demand for water resources, due to factors such as population growth and anthropic activities, has become one of the main causes of water stress. It is then necessary to implement strategies for quantifying the water resource that allow making resource management decisions. This work evaluated the applicability of InVEST, a tool for the analysis of ecosystem services, to estimate annual water production in a strategic basin in the Colombian Andes, based on available global and local data. The sensitivity analysis found that the most relevant parameters are related to precipitation and evapotranspiration (parameters "Z" and "Kc") and an acceptable calibration of the model was achieved (percent relative error of 1.18%). Since the accuracy of the model is dependent on the input data, the importance of carrying out research studies at the local level that allow adequately characterizing the climatic and biophysical conditions of the basin was evidenced, being necessary to analyze mainly the parameters of greater uncertainty (Kc, ETO and root depth). The calibrated model served to evaluate water production for future conditions of land use and cover and demand. Although there were no major changes in water production due to changes in land use and cover, a possible shortage was identified for the maximum demand scenario.

Introducción

El estrés hídrico es una condición que afecta actualmente a un cuarto de la población mundial (Morales, 2019). El crecimiento poblacional contribuye significativamente a esta situación pues incrementa las necesidades de agua tanto para el consumo directo (agua potable) como el indirecto (por ejemplo, agua para la agricultura y los procesos industriales). Actualmente un 70% del recurso hídrico (agua dulce) es destinado a la agricultura; se estima que para el 2050 la producción agrícola aumente en un 60% y, en consecuencia, la extracción de agua aumentará en un 15%. Adicionalmente, se estima que para el 2030 el mundo enfrentará un déficit del 40% en la oferta hídrica y para el 2050, 1800 millones de personas habitarán en países del mundo con déficit de agua (World Bank, 2017). Por esta razón se hace necesario trabajar en la reducción del riesgo por estrés hídrico desde diferentes perspectivas (tecnológicas, regulatorias, comportamentales y de manejo).

Los fondos de agua son una estrategia de trabajo integrado entre los actores relevantes de una región para la preservación del recurso hídrico en aras de garantizar su disponibilidad para su uso doméstico o industrial en condiciones presentes y futuras (García, 2021). Estos mecanismos son de vital implementación en zonas con alto riesgo de estrés hídrico como es el caso de cuencas estratégicas abastecedoras de agua potable para las ciudades o agua para riego en zonas de actividad agrícola intensiva. En este sentido, a nivel global ya se han creado 43 fondos de agua en trece países del mundo (The Nature Conservancy, 2020). Dado que este mecanismo implica decisiones de inversión para actividades de restauración, conservación y protección del ecosistema, es necesario realizar ejercicios de modelación que permitan orientar el proceso de toma de decisiones. Para esto se requiere de la implementación de herramientas de modelación como InVEST, software elaborado por el Natural Capital Project y avalado por la Alianza

Latinoamericana de Fondos de Agua (Zaks, 2019). Esta herramienta ha sido útil en el análisis de servicios ecosistémicos en muchas regiones del mundo, pero su uso es incipiente en algunas regiones de América Latina como Colombia.

Este trabajo evaluó la viabilidad de InVEST como herramienta de modelación de producción hídrica en una cuenca estratégica en el nororiente colombiano, identificando sus potencialidades y retos de implementación, y realizó una evaluación de escenarios futuros de producción hídrica basados en alternativas de manejo del uso del suelo y teniendo en cuenta la demanda potencial del recurso hídrico para condiciones futuras.

1. Objetivos

1.1 Objetivo general

Evaluar la aplicabilidad de la herramienta InVEST para estimar la producción hídrica de una cuenca estratégica para la provisión del recurso hídrico de una población metropolitana localizada en los andes colombianos.

1.2 Objetivos específicos

- Gestionar la información requerida que permita caracterizar los procesos relevantes para el cálculo de producción hídrica en la cuenca de estudio.
- Aplicar el modelo de producción hídrica en la cuenca de estudio para obtener resultados ante condiciones presentes y futuras en función de escenarios de uso del suelo y demanda.
- Evaluar las potencialidades y retos asociados a la implementación del modelo InVEST en cuencas estratégicas de la región andina colombiana.

2. Estado del arte del arte del modelo de producción hídrica con InVEST

2.1 Modelación hidrológica, producción hídrica e InVEST

La modelación hidrológica es una estrategia que permite representar los distintos procesos físicos que ocurren en una cuenca hidrográfica por la interacción de factores como la geología, clima, vegetación, topografía e intervención antrópica (Ramos, 2013) y que influyen en la generación de caudales a partir de eventos de lluvia (Horton et al., 2022). Estos modelos son representaciones de la realidad que, al ser validados, proporcionan información pertinente para la toma de decisiones y la prevención de desastres naturales como inundaciones o periodos de sequía (Scordo et al., 2018), haciendo que su uso en la actualidad sea de gran relevancia alrededor del mundo (Caetano & Casaroli, 2016), extendiéndose principalmente en países desarrollados (Estrada & Pacheco, 2012; Paul et al., 2021).

Existe una amplia variedad de modelos hidrológicos que han sido planteados bajo diferentes hipótesis (Horton et al., 2022); entre estos se encuentran los modelos enfocados en la producción hídrica que permiten conocer los procesos del ciclo hidrológico de mayor relevancia con el fin de ayudar a gestionar de forma eficaz los recursos hídricos y mejorar su rendimiento (Lüke & Hack, 2018; Paul et al., 2021; Zaks, 2019). El propósito del estudio, la resolución espacial y temporal deseada, y la disponibilidad de información existente para el sitio de interés (entre otros factores) determinan el nivel de complejidad del modelo a usar y, consecuentemente, la herramienta apropiada. La literatura muestra que los estudios más complejos de producción hídrica se han realizado con herramientas como *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) (Abbaspour et al., 2009, 2015), *Penn State Integrated Hydrologic Modeling System Soil and Water* (PHIM) (Seo et al., 2019; Yu et al., 2015), o MIKE SHE (Viney et al., 2009; Zheng et al., 2020), mientras que se han obtenido estimativos de producción hídrica aceptables con modelos más simples como

Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs (InVEST) (Scordo et al., 2018; Su & Fu, 2013), *Water Evaluation and Planning* (WEAP) (Agarwal et al., 2019; Vogel et al., 2007), entre otros (Viney et al., 2009).

El modelo InVEST ha tenido gran reconocimiento en la comunidad académica y de investigación aplicada en cuanto permite mapear y valorar los bienes y servicios que ofrece la naturaleza al ser humano (servicios ecosistémicos) (Redhead et al., 2016; Zaks, 2019). La producción hídrica que se calcula con esta herramienta permite evaluar los servicios ecosistémicos relacionados con el agua (producción hidroeléctrica, agua limpia, hábitat de calidad, etc.) (Ningrum et al., 2022) y, por lo tanto, comprender de una manera más holística la interacción entre el recurso hídrico y el ser humano (Yang et al., 2019).

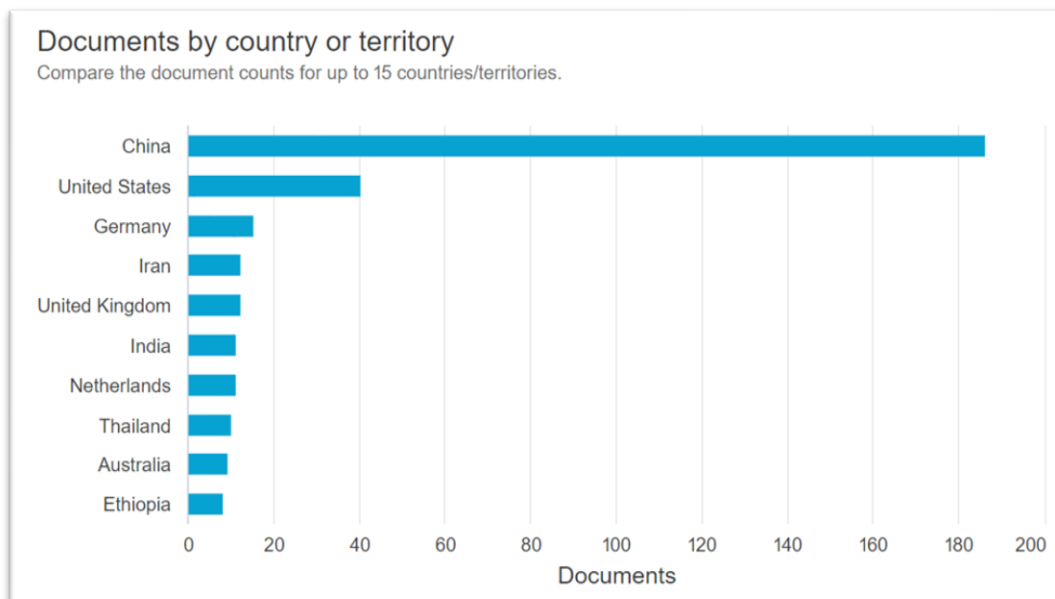
Desde el punto de vista operativo, InVEST ofrece de manera gratuita un conjunto de modelos en código abierto que analizan espacialmente los servicios ecosistémicos de interés (individualmente) produciendo resultados en términos biofísicos o económicos en la resolución de interés del investigador. Los modelos se basan en funciones de producción que determinan la manera como los cambios en la estructura y función del ecosistema pueden afectar los flujos y los valores de los servicios evaluados en el área de estudio, e incorporan en el análisis la interacción entre la provisión del servicio y la ubicación de las personas o actividades que se benefician de dicho servicio (Sharp et al., 2020; Zaks, 2019). Para el caso de la herramienta de producción hídrica anual, el modelo permite determinar la disponibilidad de agua en la región de estudio, evidenciando las áreas de mayor producción hídrica, y así, las que deben ser protegidas debido a su gran influencia en la zona de interés, proporcionando información útil para la toma de decisiones (Izquierdo & Clark, 2012; Nahib et al., 2021), y la evaluación de escenarios de uso de suelo óptimos para el rendimiento hídrico (Srichaichana et al., 2019).

2.2 Estudios de evaluación de la producción hídrica con InVEST

La base de datos de InVEST muestra que hasta mayo del 2021 se han publicado cerca de 221 estudios sobre la producción hídrica en el mundo, en donde prima China con 109 artículos, seguido por Estados Unidos con 17. Para el caso de Colombia, solo se registra una publicación hasta esa fecha (Mandle & Natural Capital Project, 2019). Por otra parte, mediante un análisis bibliométrico usando la base de datos bibliográficos Scopus, e introduciendo en el buscador las palabras clave “InVEST” y “water yield model”, se encontró que a mayo del 2022 existían 296 documentos relacionados con producción hídrica usando InVEST (Figura 1); al igual que en la base de datos de InVEST, el país con más documentos publicados es China (186 artículos), seguido de Estados Unidos (40 artículos). Adicionalmente, la búsqueda realizada en la base de datos Scopus evidencia un aumento significativo en el número de publicaciones de estudios con InVEST para producción hídrica en los últimos años (Figura 2).

Figura 1

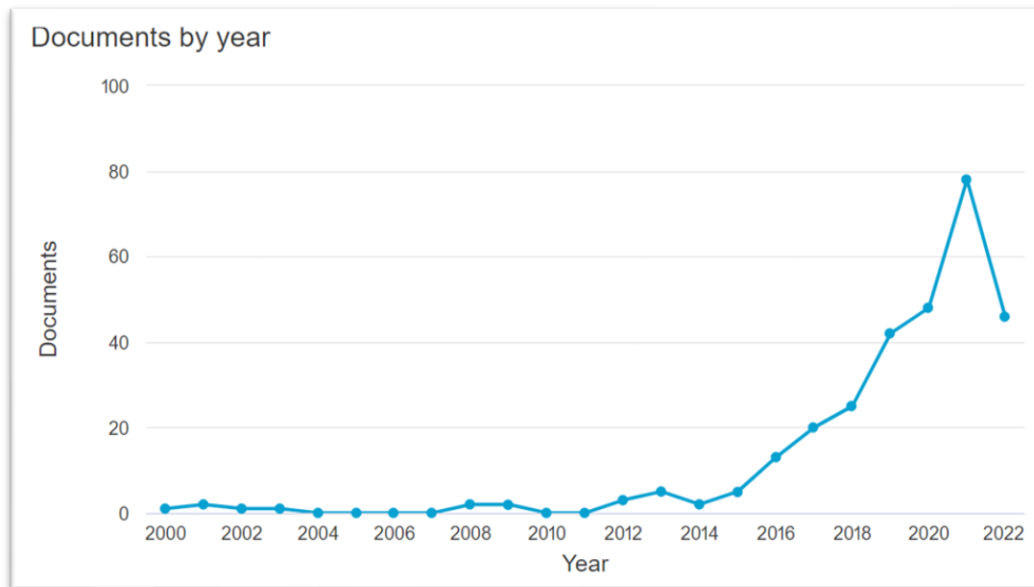
Número de artículos por país relacionados con el cálculo de producción hídrica con InVEST según la base de datos Scopus



Nota. Tomado de <https://www.scopus.com/>

Figura 2

Número de artículos por año relacionados con el cálculo de producción hídrica con InVEST según la base de datos Scopus



Nota. Tomado de <https://www.scopus.com/>

Dentro de los estudios más citados en las bases de datos evaluadas se encuentran “Quantifying and mapping multiple ecosystem services change in West Africa” (247 citaciones) (Leh et al., 2013), “Evolution of ecosystem services in the Chinese Loess Plateau under climatic and land use changes” (176 citaciones) (Su & Fu, 2013) y “Empirical validation of the InVEST water yield ecosystem service model at a national scale” (147 citaciones) (Redhead et al., 2016). Los tres estudios coinciden en tres ideas: (1) la falta de datos locales con alta resolución y la falta de estudios a nivel global que avalen la aplicabilidad del software en zonas con comportamiento hidrológico específico; (2) el papel importante que juega el cambio del uso y cobertura de suelo en la fluctuación de los servicios ecosistémicos; y (3) la necesidad de considerar emplear un análisis de sensibilidad que permita comprender la incertidumbre en las predicciones del modelo.

A nivel de Latinoamérica y países con zonas tropicales, son pocos los estudios realizados con InVEST. Sin embargo, en los trabajos de estas regiones se ha encontrado que tanto las

potencialidades como los retos encontrados en la aplicabilidad de este software presentan una gran similitud entre sí. Entre las potencialidades halladas están: (1) la facilidad de manejo que posee el software, sin requerir altas especificaciones técnicas del equipo y la poca cantidad de parámetros de entrada que este requiere; (2) la facilidad en la calibración, que a diferencia de otros programas, es directa y objetiva (Sahle et al., 2019); (3) el modelo puede ser utilizado para estimar la producción hídrica en países en desarrollo con climas tropicales (Nahib et al., 2021); y (4) el modelo ha permitido designar áreas estratégicas como zonas boscosas, de matorrales y páramos, que influyen en la provisión de servicios ecosistémicos y que, por tanto, deberían dotarse de protección especial por parte de las autoridades competentes (Clerici et al., 2019).

Por otro lado, se identificaron algunos retos al llevar a cabo la modelación de la producción hídrica con InVEST como (1) la dependencia de sistemas de información geográfica (ArcGIS, QGIS u otro software SIG) para procesar, ordenar, adaptar y observar datos y resultados (Nahib et al., 2021); (2) la precisión del modelo es dependiente de los datos de entrada, especialmente de la precipitación y evapotranspiración (Redhead et al., 2016), y, en general, se presenta dificultad con la obtención y precisión de estos (Yudistiro et al., 2019); (3) ausencia de datos con alta resolución espacial, principalmente en el área de información biofísica como es el caso del parámetro k_c o la profundidad de raíz para ciertas regiones, resultando en modelos imprecisos o sesgados por el uso de parámetros inexactos (Leh et al., 2013). Finalmente, en términos de la conceptualización del modelo, existen factores que generan ambigüedades como (a) el método de estimación de consumo de agua es muy básico y no considera las captaciones de agua diferentes a las relacionadas con el consumo humano (Redhead et al., 2016; Su & Fu, 2013); (b) la precisión del modelo puede variar para diferentes cuencas y sobreestimar la producción hídrica, lo cual puede deberse a que el modelo anual de producción hídrica no es capaz de percibir las variaciones

del suministro de agua en el transcurso del año (Leh et al., 2013; Redhead et al., 2016; Rosero, 2018); y (c) el modelo no considera ciertas variables que afectan la producción hídrica como las aguas subsuperficiales (Redhead et al., 2016).

Uno de los resultados más relevantes indica la importancia de evaluar los cambios de los parámetros principales en la modelación hídrica (Pessacg et al., 2020) como la precipitación, evapotranspiración, el clima (Clerici et al., 2019) y el uso y cobertura de suelo (LULC) (Nahib et al., 2021; Srichaichana et al., 2019) debido a que las variaciones de estos afectan a la producción hídrica. Entre estos, la precipitación es el factor de mayor impacto, seguido de la evapotranspiración y el uso de suelo (Clerici et al., 2019; Nahib et al., 2021). Se encontró que pequeñas variaciones entre los conjuntos de datos de precipitación pueden resultar en grandes cambios en la producción hídrica (Pessacg et al., 2015) y, además, la disminución de la precipitación afecta de manera más predominante que el aumento de la evapotranspiración (Pessacg et al., 2020). Otros resultados señalan que la planeación a futuro, como puede ser la proyección de uso de suelo, es fundamental para definir áreas de conservación (Resende et al., 2019) y prevenir que la urbanización de pastos de agricultura tenga efectos significativos en la producción hídrica (Clerici et al., 2019).

Previo a la etapa de calibración se recomienda realizar un análisis de sensibilidad de los datos de entrada requeridos por el software, procedimiento en el cual se determinan cuáles son los parámetros más sensibles en el modelo de producción hídrica anual (Sánchez-Canales et al., 2012). A partir de estudios previos se observó que el método más utilizado para realizar el análisis de sensibilidad en el modelo de producción hídrica de InVEST es el método Morris, que evalúa la importancia de la variación de cada parámetro de entrada (Sánchez-Canales et al., 2012), llevándose a cabo mediante la variación manual de manera porcentual (-20% a 20%) del valor de

parámetros ya establecidos como la precipitación, evapotranspiración, profundidad efectiva del suelo (K_c), y la variación manual de Z dentro del rango de 1 a 30 (Hamel & Guswa, 2015; Redhead et al., 2016). Mediante este análisis, se encontró que los parámetros más sensibles fueron las variables climáticas, entre las que se destaca la precipitación (Pessacg et al., 2015; Sahle et al., 2019; Yang et al., 2019) por encima de la ET, seguidas por factores como Z y K_c , y por último, generando una menor influencia en la producción hídrica, están la fracción de agua disponible para las plantas y la profundidad de raíz (Hamel & Guswa, 2015; Redhead et al., 2016).

Una vez realizado el análisis de sensibilidad, se procede a realizar la calibración del modelo. En la mayoría de estudios revisados, este proceso se llevó a cabo mediante la calibración del parámetro Z , que consiste en determinar el valor con el cual la diferencia entre las producciones hídricas observada y modelada sea mínima; en algunos casos, cuando existió información para varias estaciones hidrométricas, esta calibración se realizó por cada subcuenca individualmente, es decir, se compararon los datos simulados en cada una con los datos observados en las estaciones existentes en la cuenca, teniendo en cuenta el aporte generado por cada subcuenca a cada uno de los puntos de medición de caudal (Hamel & Guswa, 2015; Minga León, 2018; Rosero, 2018).

3. Metodología

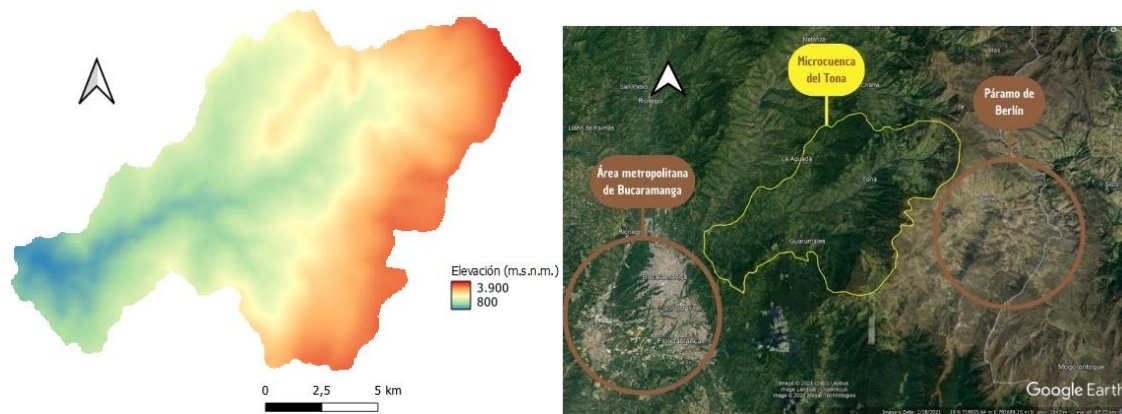
3.1 Descripción general del sitio de estudio

El río Tona es una de las principales fuentes de agua para el Área Metropolitana de Bucaramanga, aportando en el año 2021, cerca del 57% del agua tratada por Acueducto Metropolitano de Bucaramanga (amb) (Acueducto Metropolitano de Bucaramanga, 2021c). Este nace entre los páramos Santurbán y Pescadero del Macizo de Santander, contando con un rango de elevaciones entre 3860 m en sus partes más altas y 836 m en su parte baja; además posee fuertes pendientes que hacen que los cursos de las aguas corran por gargantas y posean alto poder erosivo

y de arrastre ya que parte de las rocas y suelos de la región son de origen igneometamórfico con gran alteración (Acueducto Metropolitano de Bucaramanga, 2017) (Figura 3).

Figura 3

Modelo de elevación digital de la cuenca del río Tona y su ubicación

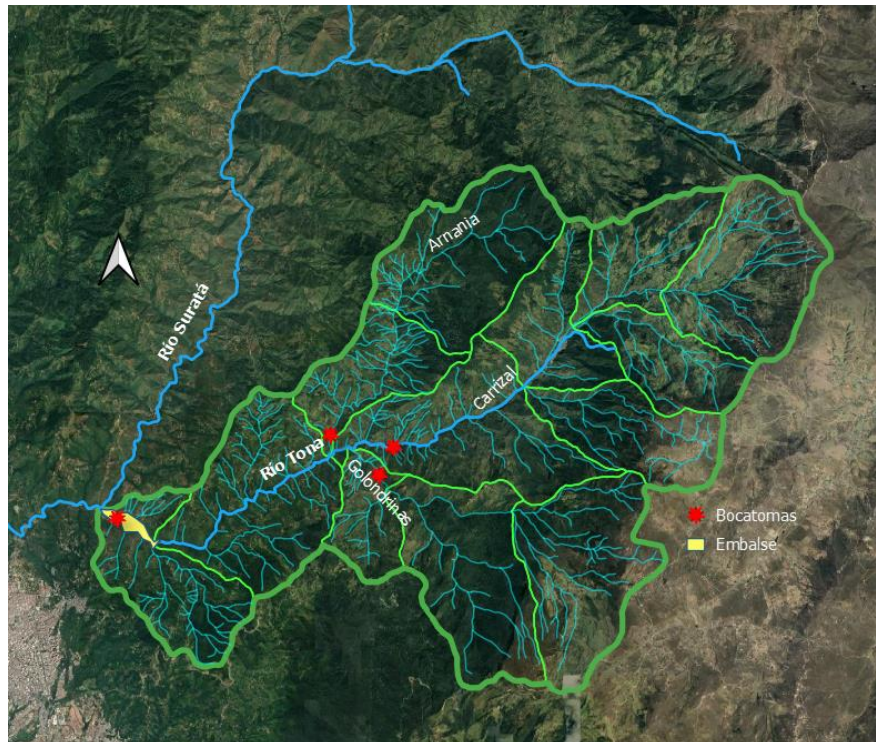


Nota. El recuadro de la parte derecha de la figura muestra la ubicación de la cuenca del río Tona en relación con el área metropolitana de Bucaramanga. Adaptado de cartografía de Google Earth

El río Tona cuenta un área aferente de 194 km² hasta su desembocadura en el río Suratá (Acueducto Metropolitano de Bucaramanga, 2017) y posee tres afluentes principales que son las quebradas Armania, Carrizal, y Golondrinas; en cada uno de ellos se ubica una bocatoma que contribuye a una extracción total garantizada de 750 lps (0.75 m³/s) y máxima total de 1260 lps (1.26 m³/s). En la parte baja de la cuenca, 600 metros aguas arriba de la confluencia entre los ríos Tona y Suratá, se ubica el embalse de Bucaramanga, cuyo llenado se completó en el año 2016, con una capacidad volumétrica de 18 millones de metros cúbicos de agua y cuyo propósito es proveer a la población de los municipios de Bucaramanga, Floridablanca y Girón una capacidad adicional de 1200 lps (1.2 m³/s), y en épocas de bajo caudal, proveer 2000 lps (2.0 m³/s) para la planta de Bosconia, equivalente a una reserva de agua para 3 meses de consumo (Acueducto Metropolitano de Bucaramanga, 2021b) (Figura 4).

Figura 4

Hidrografía de la cuenca del río Tona con sus afluentes principales, bocatomas, y ubicación gráfica del embalse



Nota. Adaptado de cartografía de Google Earth

3.2 Modelo InVEST para la producción hídrica anual

InVEST estima las contribuciones relativas de agua de cada sector de la cuenca, determinando la producción hídrica de cada píxel como la precipitación menos la fracción de agua que sufre evapotranspiración (*ET*), para luego sumarlas y promediarlas a nivel de subcuenca y posteriormente a nivel de cuenca. Teniendo en cuenta los resultados de producción hídrica, y conociendo la distribución del uso y cobertura de suelo en la cuenca, el modelo es capaz de ofrecer información sobre cómo afectan los cambios en los patrones de uso de suelo en la producción anual del agua superficial (Sharp et al., 2020).

El modelo de producción hídrica anual está basado en la curva de Budyko y la precipitación promedio anual. Para cada píxel, la producción anual de agua $Y(x)$ se calcula como:

$$Y(x) = \left(1 - \frac{AET(x)}{P(x)}\right) * P(x) \quad (1)$$

Donde $AET(x)$ es la ET anual real para el píxel x y $P(x)$ es la precipitación anual en el píxel x (Sharp et al., 2020).

Para el cálculo de la fracción de agua que sufre ET (es decir, $AET(x)/P(x)$) en tipos de uso de suelo con vegetación, el modelo hace uso de la expresión de la curva de Budyko propuesta por Fu (Fu, 1981) y Zhang et al. (Zhang et al., 2004):

$$\frac{AET(x)}{P(x)} = 1 + \frac{PET(x)}{P(x)} - \left[1 + \left(\frac{PET(x)}{P(x)}\right)^\omega\right]^{\frac{1}{\omega}} \quad (2)$$

Donde $PET(x)$ es la ET potencial para cada píxel y $\omega(x)$ es un parámetro que caracteriza las propiedades climáticas y del suelo.

Para obtener $PET(x)$ se hace uso de la expresión:

$$PET(x) = k_c(\ell_x) \cdot ET_0(x) \quad (3)$$

Donde $ET_0(x)$ corresponde a la ET de un cultivo de referencia como pasto o alfalfa para el píxel x y $k_c(\ell_x)$ hace referencia al coeficiente de evapotranspiración de la planta para el tipo de uso de suelo ℓ_x , el cual ajusta los valores de ET_0 al tipo de cultivo presente en cada píxel.

$\omega(x)$ es un parámetro relacionado con el parámetro Z (depende del número de eventos de lluvia, N , en el año) y con el contenido volumétrico de agua disponible para las plantas AWC . En InVEST estos parámetros se relacionan con la expresión propuesta por Donohue et al. (Donohue et al., 2012):

$$\omega(x) = Z \cdot \frac{AWC(x)}{P(x)} + 1.25 \quad (4)$$

Donde AWC se calcula como el producto entre la capacidad de agua disponible para las plantas ($PAWC$) y el mínimo entre la profundidad de la capa de restricción de la raíz y la profundidad de raíz de la vegetación:

$$AWC(x) = \text{Min}(\text{Rest. layer. depth}, \text{Root. depth}). PAWC \quad (5)$$

Para tipos de uso de suelo sin vegetación (aguas abiertas, urbano, humedales) la *ET* real se calcula directamente a partir de la *ET* de referencia y también depende de la precipitación, calculándose con la siguiente expresión:

$$AET(x) = \text{Min}(k_c(\ell_x). ET_0(x), P(x)) \quad (6)$$

3.3 Descripción y procesamiento de los insumos del modelo

La ventana de tiempo para la modelación con InVEST en la cuenca del río Tona fue de 16 años (1987-2002). Este período cuenta con información completa de precipitación para 5 estaciones y de caudal en el punto de cierre de la cuenca (antigua estación Puente Tona). Aunque sería deseable una ventana de tiempo más amplia, se cuenta con más de 10 años, tiempo mínimo recomendado por el software para que la muestra de datos requeridos por el modelo sea representativa.

Para la recolección de los datos de entrada al modelo se tuvo en cuenta las fuentes recomendadas por la guía de usuario InVEST, datos obtenidos de entidades relevantes en la región de interés como el amb, la CDMB e IDEAM, y trabajos de investigación realizados previamente en la región de estudio (Carrillo Peña, 2018; Gómez & Rodríguez, 2018). Además, se buscó que todos los datos espaciales requeridos tuvieran el mismo sistema de referencia de coordenadas. Debido a la ubicación de la zona de estudio, se usó el sistema “MAGNA - SIRGAS /Colombia Bogota zone”.

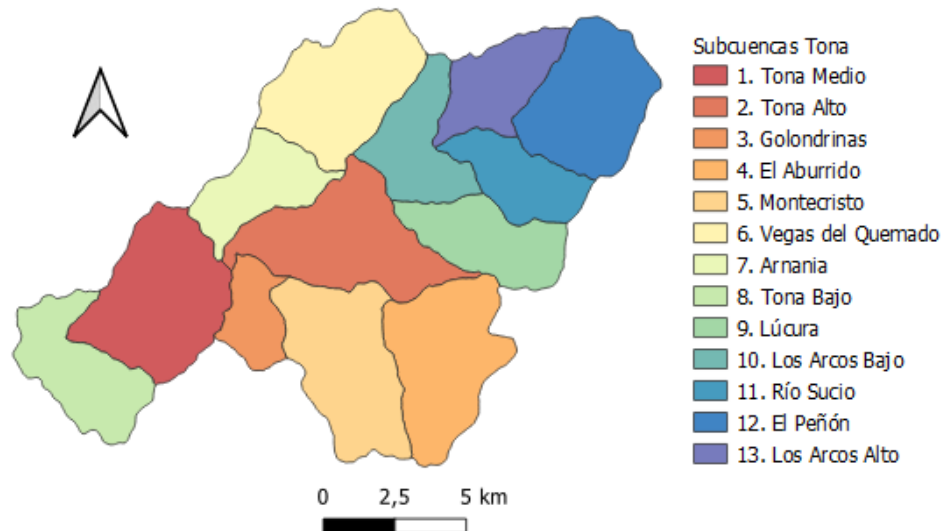
3.3.1 Cuencas y subcuencas

Para la delimitación del área de trabajo correspondiente a la cuenca del río Tona el software requiere archivos tipo shapefile (.shp) que definan las áreas de la cuenca y las subcuencas del sitio de estudio con el fin de proporcionar resultados a diferentes escalas. Esta información se obtuvo

de la tesis “Estimación de la producción hídrica para la cuenca del río Tona mediante el modelo hidrológico semidistribuido SWAT” (Carrillo Peña, 2018) (Figura 5).

Figura 5

Subcuencas de la cuenca del Tona



Nota. Tomado de (Carrillo Peña, 2018)

3.3.2 Precipitación anual promedio

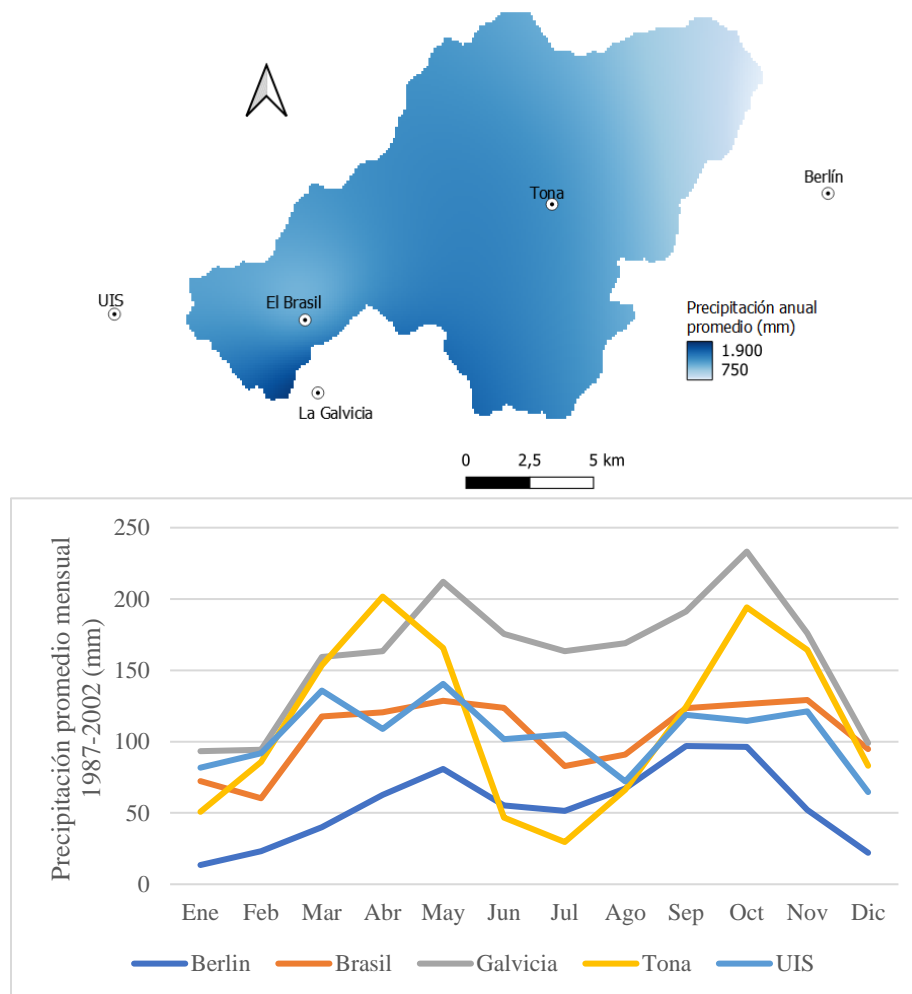
Los datos de precipitación anual promedio en el tiempo de estudio se obtuvieron a partir de la información procesada por los autores de la tesis titulada “Aplicabilidad de datos climatológicos escalados para la modelación hidrológica de la cuenca del río Tona en Santander” (Gómez & Rodríguez, 2018), que se soportó en información provista por el amb, la CDMB y el IDEAM. En este caso, se tiene la precipitación diaria desde el año 1987 hasta el 2002 para las estaciones Berlín, El Brasil, La Galvicia, Tona y UIS, además de sus coordenadas geográficas. Estas estaciones permiten una representación clara de los patrones espaciales y temporales de precipitación en la cuenca (Figura 6).

Para la modelación fue necesario generar un mapa rasterizado de precipitación anual en milímetros por pixel en la cuenca de estudio. Primero, se totalizaron los valores anuales de

precipitación usando Excel a partir de los datos diarios disponibles para cada estación. A continuación, se implementó una interpolación tipo spline (Multilevel B-Spline) usando las funciones de SAGA en el software QGIS; se generaron rásteres con resolución de 100 m, para cada año, a partir de las precipitaciones anuales de las estaciones georeferenciadas. Finalmente, los rásteres generados se recortaron usando la divisoria de la cuenca como máscara. También se hizo este proceso para el promedio de las precipitaciones anuales de todo el periodo (Figura 6, panel superior).

Figura 6

Ráster de precipitación anual promedio en la cuenca del río Tona (panel superior) y gráfica con promedio de precipitaciones mensuales por estación en el periodo 1987-2002 (panel inferior)



3.3.3 *Evapotranspiración (ET) de referencia media anual*

Para implementar el proceso de *ET* que ocurre en las plantas y afecta la producción hídrica de la cuenca, InVEST requiere datos anuales de *ET* en milímetros en formato ráster. Se revisaron dos fuentes para la *ET* de referencia media anual. La primera se obtuvo del “Consultative Group on International Agricultural Research-Consortium for Spatial Information” (CGIAR-CSI) (Trabucco & Zomer, 2019). Este producto es un ráster global con una resolución de 900 m que caracteriza esta variable para el período 1970 – 2000 en milímetros, usando la ecuación de *ET* de Penman-Monteith para un cultivo de referencia. Los insumos para este cálculo se originan en la base de datos WorldClim. El sistema geográfico de referencia de esta información es el WGS84 requiriendo hacer la conversión adecuada para el proyecto.

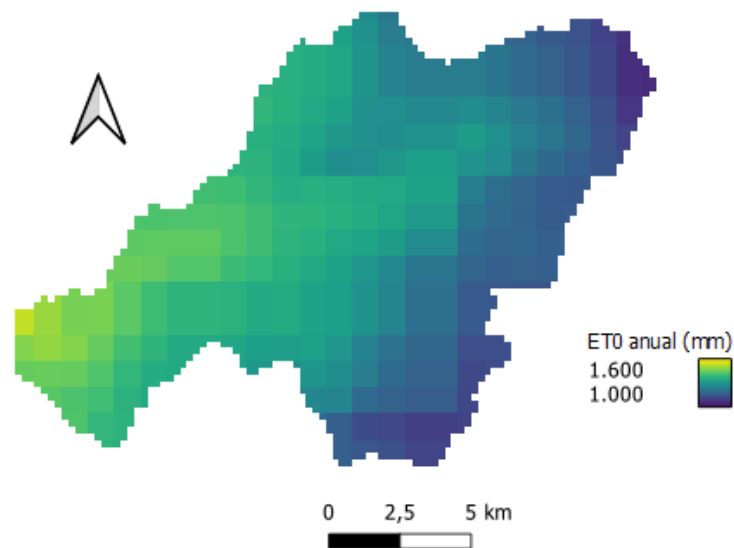
La segunda fuente se utilizó con el fin de lograr una mejor aproximación a la producción hídrica anual. Esta se obtuvo de AQUASTAT, un sistema de información global de la “Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura” (FAO, por sus siglas en inglés) sobre recursos hídricos y gestión agrícola del agua (AQUASTAT (FAO), 2021). Este recurso cuenta con una serie de rásteres globales anuales con una resolución de 10 km que caracteriza la *ET* de referencia anual desde 1979 hasta 2021 en milímetros, modelados con el método de Penman-Monteith de la FAO, teniendo como referencia el conjunto de datos de indicadores agrometeorológicos producidos por el Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Plazo Medio (ECMWF) a través del Servicio de Cambio Climático Copernicus (C3S). Al igual que la primera fuente, el sistema geográfico de referencia es el WGS84 por lo que también fue necesario hacer la conversión adecuada para el proyecto.

Para el primer caso, se hizo un cambio de resolución usando la calculadora ráster de QGIS, buscando obtener una mejor resolución para el análisis espacial, en este caso de 230 m. Para el

segundo caso, debido a que presentaba una menor resolución espacial, fue necesario realizar interpolación tipo spline (Multilevel B-Spline) usando las funciones de SAGA en el software QGIS, como en el caso de la precipitación, generando rásteres de 100 m. Finalmente, para ambos casos, se recortaron los rásteres usando la divisoria de la cuenca como máscara (Figura 7).

Figura 7

Evapotranspiración anual promedio (mm) para el período 1970-2000



Nota. Tomado de CGIAR-CSI (<https://cgiarcsi.community/2019/01/24/global-aridity-index-and-potential-evapotranspiration-climate-database-v2/>)

3.3.4 Profundidad efectiva del suelo

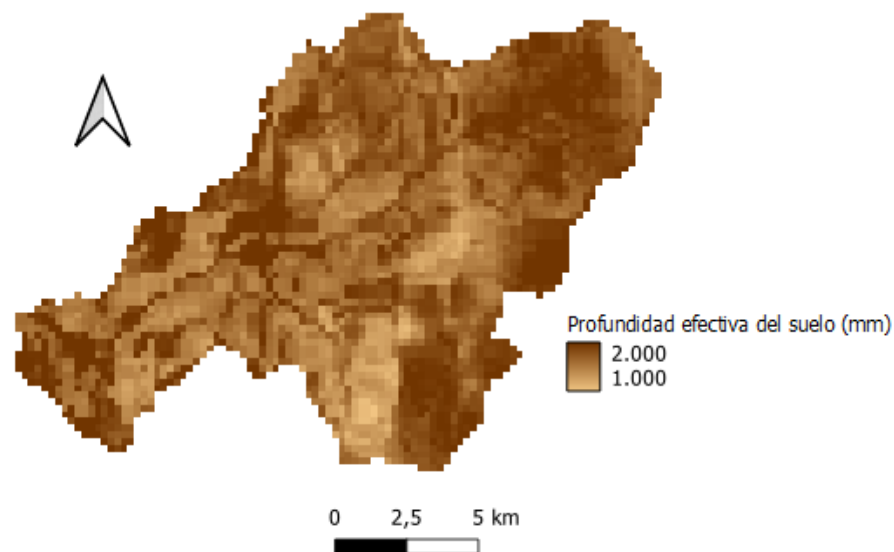
La profundidad efectiva del suelo es la profundidad del suelo a la cual la penetración de la raíz está fuertemente inhibida debido a sus características físicas o químicas (Sharp et al., 2020). InVEST requiere esta información en formato ráster y en unidades de milímetros. La profundidad efectiva del suelo se obtuvo de “International Soil Reference and Information Centre” (ISRIC) (Hengl et al., 2017). Este producto es un ráster global con una resolución de 230 m, que caracteriza esta variable para el período 1949 – 2015 con unidades en centímetros, y que se basó en una

compilación global de datos de perfil de suelo y de pozos. El sistema geográfico de referencia es el WGS84 por lo que fue necesario hacer la conversión adecuada para el proyecto.

Al igual que para el caso del ráster de *ET*, se realizó un recorte inicial para el fácil manejo del mapa, seguido de la conversión del sistema de referencia, la delimitación con la divisoria de la cuenca y la conversión de unidades de centímetros a milímetros a través de la función “Calculadora ráster” con la ayuda del software QGIS (Figura 8).

Figura 8

Profundidad efectiva del suelo (mm) para el período 1949-2015



Nota. Tomado de ISRIC

(<https://data.isric.org/geonetwork/srv/eng/catalog.search#/metadata/bfb01655-db81-4571-b6eb-3caae86c037a>)

3.3.5 Contenido de agua disponible para las plantas (PAWC)

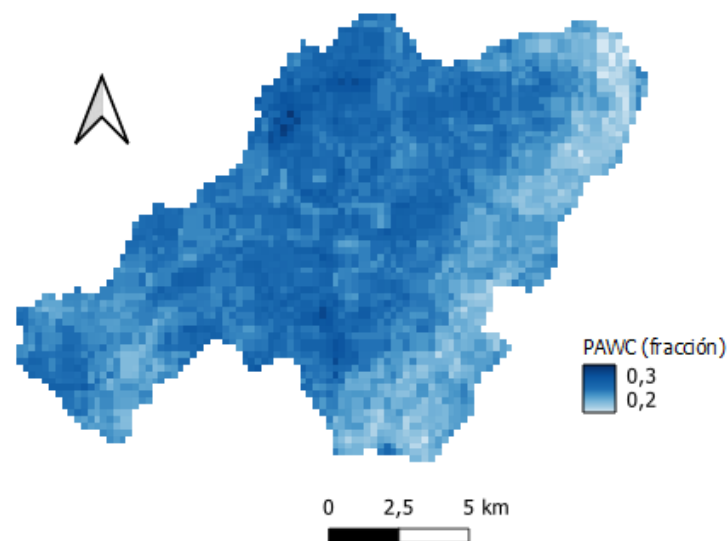
El contenido de agua disponible para las plantas (PAWC, por su nombre en inglés *plant available water content*) se puede definir como la fracción de agua que se puede almacenar en el perfil del suelo y que está disponible para el uso de las plantas. Para incluir esta variable, InVEST

requiere un mapa ráster con valores de 0 a 1 para cada pixel. El PAWC se obtuvo de ISRIC (Hengl et al., 2017). Este producto es un conjunto de rásteres globales con una resolución de 230 m, que caracteriza esta variable para el período 1949 – 2015 para profundidades de suelo de 0, 5, 15, 30, 60, 100 y 200 centímetros, expresado como fracción volumétrica (v%) y definido a partir de una compilación global de observaciones de suelo. El sistema geográfico de referencia es el WGS84 por lo que fue necesario hacer la conversión adecuada para el proyecto.

Como en el caso de la profundidad efectiva del suelo, el procesamiento de los datos se realizó con el software QGIS, iniciando con el recorte de los ráster para disminuir el peso del archivo. Después, de acuerdo con las indicaciones de la guía de InVEST, se procedió a realizar un promedio ponderado con los rásteres para las diferentes profundidades con la herramienta “Calculadora ráster” teniendo en cuenta el espesor de las capas de suelo y realizando la conversión de porcentaje a fracción. Por último, se realizó el recorte del mapa ráster resultante para delimitar el área de la cuenca del río Tona (Figura 9).

Figura 9

Fracción promedio de contenido de agua disponible para las plantas para el período 1949-2015



Nota. Tomado de ISRIC

(<https://data.isric.org/geonetwork/srv/eng/catalog.search#/metadata/e33e75c0-d9ab-46b5-a915-cb344345099c>)

3.3.6 *Uso y cobertura de suelo*

La información de uso y cobertura de suelo se tomó del estudio de Carrillo Peña (Carrillo Peña, 2018) que configuró un mapa de uso y cobertura basado en estudios previos de la zona. La nomenclatura de los tipos de uso de suelo se presenta en la Tabla 1. Con el fin de obtener el tipo de archivo requerido por InVEST, a partir del archivo shapefile obtenido como insumo básico, se agregó una columna con un número entero secuencial (lucode) para cada tipo de uso de suelo y posteriormente se procedió a convertir el archivo de shapefile a ráster mediante el software QGIS. Por la resolución de la información de uso del suelo disponible (escala 1:25.000), se generó un ráster de 12.5 metros de resolución espacial (Tobler, 1987) (Figura 10).

Tabla 1

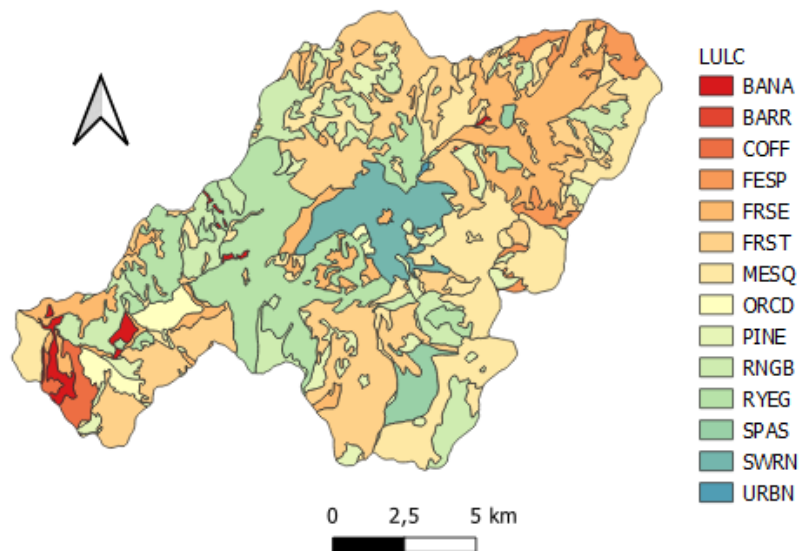
Tipos de uso de suelo

Tipos de uso de suelo	Código
Zona Urbana	URBN
Cultivos agrícolas transitorios (banano)	BANA
Cultivos agrícolas permanentes (café)	COFF
Pastos naturales	PAST
Pastos mejorados	SPAS
Tierras mixtas, cultivos y pastos	RYEG
Tierras mixtas, rastrojos y cultivos	SWRN
Silvopastoril, potreros arbolados	RNGB
Silvoagrícola, cultivos permanentes o semipermanentes con sombrío	ORCD
Bosque natural, secundario	FRST
Bosque natural, rastrojo	MESQ
Bosque plantado, coníferas y latifoliadas	PINE
Matorral paramuno	FESP
Herbáceas, pajonales	MESQ
Afloramiento rocoso masivo	BARR

Nota. Tomado de (Carrillo Peña, 2018)

Figura 10

Mapa de uso y cobertura de suelo de la cuenca del río Tona



Nota. Tomado de (Carrillo Peña, 2018)

3.3.7 *Tabla biofísica*

Otro de los datos requeridos por InVEST para la modelación de la producción hídrica es una tabla biofísica, en la cual se estructura información referente al uso y cobertura de suelo como el coeficiente del cultivo (K_c) y la profundidad de raíz de este. Para esto, se requirió organizar la información en una tabla con formato ".csv" acorde con el mapa ráster de uso y cobertura de suelo (Ver Apéndice A). Los componentes de la tabla biofísica son:

3.3.7.1 *lucode*. Este parámetro consiste en un número entero asignado para cada clase de LULC.

3.3.7.2 *LULC_desc*. La columna *LULC_desc* contiene un nombre descriptivo para cada uso y cobertura de suelo.

3.3.7.3 LULC_veg. Usando los enteros 0 y 1, determina qué ecuación de evapotranspiración usará el software para cada LULC, siendo 1 para el uso de tierra con vegetación sin tener en cuenta humedales, y 0 para los demás usos de suelo.

3.3.7.4 root_depth. La profundidad de raíz máxima en milímetros para cada clase de uso de suelo. Para este parámetro se usó como fuente el capítulo 8 de la guía de la FAO “Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56” (Allen et al., 1998), en la cual se presentan diversos requerimientos para el tratamiento de cultivos, además de la tesis “Análisis del servicio ecosistémico de producción de agua para generación hidroeléctrica en la cuenca del río coca mediante el uso del software InVEST como sustento para la gestión del recurso hídrico” (Rosero, 2018). De este último documento se obtuvo la información de profundidad de raíz para el tipo de uso de suelo con vegetación paramuna.

En la Tabla 2 se encuentran los valores o intervalos de profundidad de raíz obtenidos a partir de revisión bibliográfica; sin embargo, por la definición dada por la guía de InVEST, se utilizó el valor máximo de cada uno de los intervalos. En varios casos fue necesario asumir valores de la cobertura vegetal más similar a cada tipo de uso de suelo. Por ejemplo, al uso de suelo FRSE (kikuyo trébol) se asignó profundidad de raíz de “Turf Grass”, al uso de suelo FRST (bosque natural secundario) se asignó profundidad de raíz de “Fruit trees”, al uso de suelo MESQ (gramíneas) se asignó profundidad de raíz de “Rice”, al uso de suelo ORCD (silvoagrícola) se le asignó profundidad de raíz de “Small vegetables”, a los usos de suelo RRGB (potreros arbolados) y SPAS (pastos mejorados) se asignó profundidad de raíz de “Extensive pasture”, y, finalmente, a los usos de suelo RYEG (tierras mixtas) y SWRN (tierras mixtas) se asignó profundidad de raíz de “Rye Grass hay”. Por otro lado, de acuerdo a la guía de usuario InVEST (Sharp et al., 2020),

para usos de suelo sin vegetación, la profundidad de raíz tiene un valor de -1, lo cual indica que no se tiene en cuenta.

Tabla 2

Profundidad de raíz

LULC_desc	root_depth	Fuente
BANA	500-900	Allen et al. (1998)
BARR	-1	Sharp et al. (2020)
COFF	900-1500	Allen et al. (1998)
FESP	750	Rosero, M. (2017)
FRSE	500-1000	Allen et al. (1998)
FRST	1300	Allen et al. (1998)
MESQ	700	Allen et al. (1998)
ORCD	600	Allen et al. (1998)
PINE	1000-1500	Allen et al. (1998)
RNGB	500-1500	Allen et al. (1998)
RYEG	600-1000	Allen et al. (1998)
SPAS	500-1500	Allen et al. (1998)
SWRN	600-1000	Allen et al. (1998)
URBN	-1	Sharp et al. (2020)

3.3.7.5 K_c . El coeficiente de evapotranspiración de cultivo, K_c , es utilizado por InVEST para determinar la evapotranspiración potencial a través del uso de características fisiológicas del tipo de vegetación con base en la evapotranspiración de referencia que corresponde a un cultivo de alfalfa. Este coeficiente varía entre 0 y 1.5. La obtención de este parámetro para cada uso de suelo de la zona de estudio se llevó a cabo en su mayoría mediante la recomendación dada por InVEST, es decir, a partir del capítulo 6 de la guía de la FAO “Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56” (Allen et al., 1998). Además, también se obtuvo información de la tesis “Análisis de la oferta y demanda de agua para la cuenca del Guayllabamba, bajo condiciones de sequía” (González, 2016).

Aunque existían algunos datos de K_c para los tipos de uso de suelo requeridos, un gran porcentaje de estos no estaba disponible debido a que se han realizado pocos estudios sobre este

tema en zonas tropicales como la zona de interés. Por esto, fue necesario realizar aproximaciones con base en la similitud de las características físicas entre los cultivos que se requerían y de los cuales se tenía el valor de su coeficiente (Tabla 3). Para determinar el coeficiente en un uso de suelo de vegetación paramuna se realizó una revisión bibliográfica sobre estudios de este tipo en zonas de páramo y se encontró que el valor que mejor representa el comportamiento de este cultivo es de 0.42 (Buytaert et al., 2006).

Tabla 3

Fuentes y referencias para la elección del coeficiente K_c

LULC_desc	Kc	Fuente	Cultivo de referencia
BANA	1,1	Allen et al. (1998)	Banana
BARR	0,2	Allen et al. (1998)	-
COFF	1,1	Allen et al. (1998)	Coffee
FESP	0,42	Buytaert et al. (2017)	-
FRSE	0,9	Allen et al. (1998)	Turf grass
FRST	1	González (2016)	Bosque caducifolio
MESQ	0,8	González (2016)	Matorral cerrado
ORCD	1,1	González (2016)	Mosaico de cultivos
PINE	1	Allen et al. (1998)	Conifer trees
RNGB	0,75	Allen et al. (1998)	Extensive pasture
RYEG	1	Allen et al. (1998)	Rye grass hay
SPAS	0,75	Allen et al. (1998)	Extensive pasture
SWRN	1,1	González (2016)	Mosaico de cultivos
URBN	0,2	Sharp et al. (2020)	-

3.3.8 *Parámetro Z*

El parámetro Z o factor de estacionalidad representa las características hidrogeológicas y de distribución de la precipitación de un sector, y su valor típico oscila entre 1 y 30. Este puede ser calculado con la ecuación:

$$Z = \frac{(\omega - 1.25)P}{AWC} \quad (7)$$

Donde P corresponde a la precipitación, AWC a la capacidad de agua disponible y ω a un parámetro empírico relacionado con el comportamiento hidrológico de una zona específica.

En casos donde hay escasez de información se cuenta con una alternativa, utilizada en este proyecto, que fue propuesta inicialmente por (Donohue et al., 2012) en Australia. La determinación del parámetro Z se hace a partir del número de eventos de lluvia por año (N) de la siguiente manera:

$$Z = 0.2 * N \quad (8)$$

Para la determinación de N , se trabajó un código en R que procesó las series de tiempo diarias. Se calculó el número de eventos de lluvia para cada uno de los años en cada estación, considerando que dos o más días consecutivos con precipitación se establecían como un solo evento de lluvia. Esto puede ser erróneo pues según los autores de esta ecuación, el tiempo mínimo entre dos tormentas es de 6 horas para considerarse eventos separados (Sharp et al., 2020); sin embargo, es una consideración aceptable dado que no se cuenta con datos subdiarios de precipitación para el área de estudio.

Por último, se procedió a calcular el valor de Z promediando los valores de N de las cinco estaciones para cada año, para posteriormente multiplicarlo por 0.2. Tras esto, se observó que los datos tenían un comportamiento constante, oscilando entre 11 y 13, por lo que se decidió utilizar un valor de $Z = 12$ (Ver Apéndice B).

3.4 Modelamiento inicial, análisis de sensibilidad y calibración del modelo

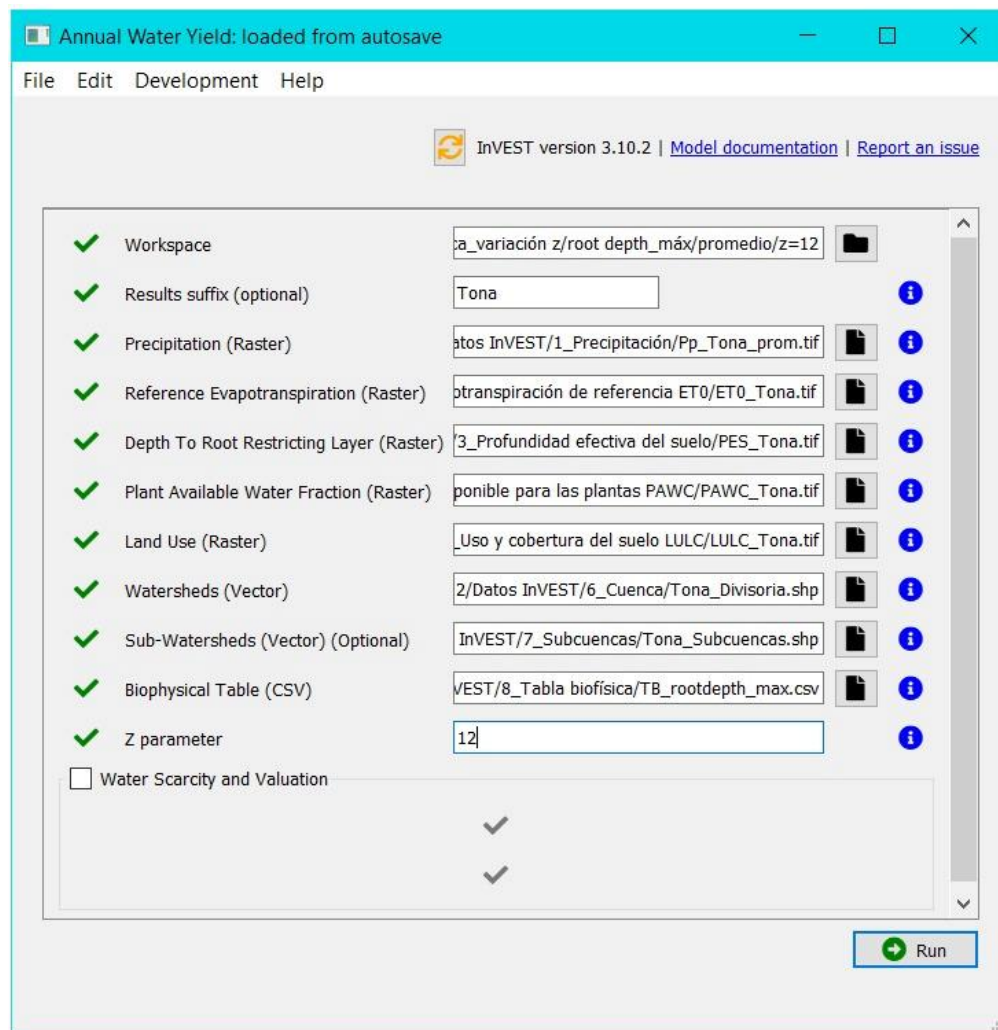
3.4.1 *Corrida inicial del modelo InVEST*

La corrida inicial del modelo buscó verificar la usabilidad de los insumos preparados y tener un primer estimativo de los volúmenes de producción hídrica promedio en el área de estudio. Esta corrida usó la precipitación promedio, el valor de Z obtenido a partir del número de eventos

de lluvia ($Z=12$), la profundidad de raíz máxima para los tipos de vegetación que contaban con intervalos, y los insumos cartográficos descritos en la sección 3.3 de este documento (Figura 11).

Figura 11

Interfaz de entrada de datos del modelo anual de producción hídrica de InVEST para Tona



Al correr el modelo se obtienen como datos de salida los rásteres de ET real (mm), fracción de precipitación que se convierte en ET real (-) y producción hídrica por pixel (mm); también un archivo vectorial (tipo .shp) de producción hídrica y tablas asociadas (tipo .csv) por subcuenca y cuenca, con datos de precipitación media (precip_mn, mm), ET potencial media (PET_mn, mm)

y ET real media (AET_mn, mm), producción hídrica media (wyield_mn, mm) y volumen de producción hídrica (wyield_vol, m³). Los datos de salida de esta corrida inicial se presentan a continuación (Tabla 4).

Tabla 4

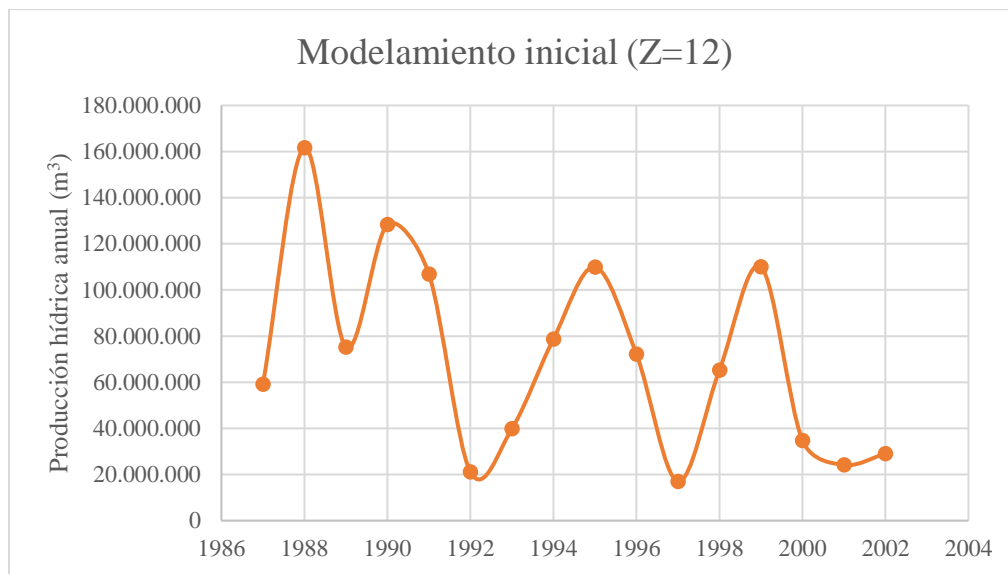
Datos de salida correspondientes a la corrida inicial del modelo InVEST para la cuenca del río Tona

Entity	LWPolyline
Layer	CUENCA_TONA
Color	3
Linetype	CONTINUOUS
Elevation	0
LineWt	25
RefName	-
Area [m²]	193.805.852
ws_id	1
precip_mn [mm]	1.303,65
PET_mn [mm]	1.196,51
AET_mn [mm]	966,75
wyield_mn [mm]	337,56
wyield_vol [m³]	65.421.652

Adicionalmente, con el fin de conocer la capacidad del modelo para simular la variación anual de producción hídrica por las variaciones anuales de precipitación, se realizaron corridas iniciales para cada año del periodo de estudio variando únicamente la precipitación y manteniendo constantes el resto de los parámetros (Figura 12).

Figura 12

Producciones hídricas anuales utilizando los datos de entrada para el modelamiento inicial



Para obtener el volumen de producción hídrica anual observada, se contó con datos de caudal diario recopilados del material utilizado para la tesis de Carrillo Peña (Carrillo Peña, 2018), conformado por el total del caudal real medido en la estación puente Tona y el captado por las captaciones del acueducto. Finalmente, para poder realizar una comparación directa con los datos simulados obtenidos, fue necesario convertir esta información de caudal diario a volumen en metros cúbicos por año (Tabla 5).

Tabla 5

Volumen de producción hídrica observada en metros cúbicos por año

Año	V Real (m ³)
1987	74.660.906
1988	100.693.244
1989	69.818.087
1990	89.668.928
1991	86.217.385
1992	48.080.514
1993	65.492.793
1994	67.246.619
1995	98.657.466

1996	100.318.201
1997	70.099.894
1998	66.325.526
1999	79.396.656
2000	71.256.384
2001	47.403.537
2002	54.948.737
Promedio	74.392.805

Tras la corrida inicial del modelo se observó gran diferencia entre los datos simulados y los datos observados. Para el caso de la producción hídrica promedio anual se encontró una diferencia de 8.971.152 m³ que representa un porcentaje de diferencia de 12,06%, y para las producciones hídrica anuales hubo diferencias entre 1.061.371 m³ y 61.032.379 m³ con errores relativos porcentuales entre 1,6% y 75,76%. Se hizo necesario entonces realizar una calibración del modelo con el fin de reducir la diferencia entre los datos modelados y observados (Tamayo García, 2017). En el caso de InVEST, la calibración se realiza manualmente, y se recomienda hacer previamente un análisis de sensibilidad de los parámetros del modelo para identificar los más relevantes para el proceso de calibración (Sharp et al., 2020).

3.4.2 *Análisis de sensibilidad de los parámetros*

Como se mencionó anteriormente, en la sección 2.2 del Estado del arte, es fundamental realizar un análisis de sensibilidad previo a la etapa de calibración con el fin de determinar cuáles son los parámetros claves para la calibración del modelo. La revisión de literatura sugirió analizar los parámetros “root depth”, “Z”, “K_c” y ET₀, pues son las variables con mayor incertidumbre, usualmente debido a su dificultad de obtención y a las consideraciones tomadas para su determinación tras la falta de estudios previos en la región de interés (Redhead et al., 2016; Rosero, 2018).

3.4.2.1 Sensibilidad de Profundidad de raíz (Root Depth). Para el análisis del comportamiento de la producción hídrica con el cambio del parámetro “root depth”, se corrió el modelo variando este en los intervalos mínimos, medios y máximos de los usos de suelo definidos en la sección 3.3.7 (Tabla 2), utilizando la precipitación anual promedio y la ET de referencia anual promedio, y manteniendo los demás parámetros iguales a los empleados en el modelamiento inicial. A partir de esto, comparando los datos de producción hídrica obtenidos para cada profundidad de raíz, se encontró que, al cambiar de la profundidad mínima a media, y de mínima a máxima, los porcentajes de cambio promedio fueron de 10,81% y 17,18%, respectivamente (Ver Apéndice C).

3.4.2.2 Sensibilidad del parámetro Z. Con el fin de conocer la sensibilidad del parámetro Z en la región de estudio, se realizó una variación de este en los valores 1, 5,10,15, 20, 25 y 30, utilizando la precipitación anual promedio, ET de referencia anual promedio y manteniendo los demás parámetros iguales a los empleados en el modelamiento inicial. Así, se calculó el porcentaje de variación de la producción hídrica con el cambio del parámetro Z, tomando como referencia el resultado de la producción hídrica obtenida en la modelación inicial ($Z=12$). Con esto, se obtuvieron variaciones entre -21,40% y 143,56%.

3.4.2.3 Sensibilidad del parámetro Kc. Al realizar una nueva revisión bibliográfica para el parámetro Kc, se construyó una tabla biofísica con nuevos datos de Kc ante condiciones climáticas y geográficas cercanas a la región de estudio (Rosero, 2018) (Tabla 6). Se corrió el modelo utilizando la precipitación anual promedio, ET de referencia anual promedio y manteniendo los demás parámetros iguales a los empleados en el modelamiento inicial.

Tabla 6*Valores de kc obtenidos de una nueva revisión bibliográfica*

LULC_desc	Kc	Fuente	Cultivo de referencia
BANA	1,2	Allen et al. (1998)	Banana
BARR	0,8	González (2016)	Escasa vegetación
COFF	1,1	Allen et al. (1998)	Coffee
FESP	0,42	Buytaert et al. (2017)	-
FRSE	1	González (2016)	Pastizal
FRST	1	González (2016)	Bosque caducifolio
MESQ	1,2	González (2016)	Mosaico de vegetación
ORCD	1,1	González (2016)	Mosaico de cultivos
PINE	1	Allen et al. (1998)	Conifer trees
RNGB	0,9	González (2016)	Pastizal cerrado
RYEG	1,1	González (2016)	Mosaico de cultivos
SPAS	0,9	González (2016)	Pastizal cerrado
SWRN	1,1	González (2016)	Mosaico de cultivos
URBN	0,7	González (2016)	Área artificial

Comparando los datos obtenidos con la modelación inicial y con el cambio del parámetro Kc, se obtuvo una variación porcentual de 18,53%.

3.4.2.4 Sensibilidad de la ET_0 . Debido a que con un ráster de ET de referencia promedio anual utilizado para todo el periodo se obtuvo mucha dispersión para los datos de producción hídrica para un mismo valor de Z, se decidió trabajar con datos de ET de referencia anual para cada año del periodo de estudio, buscando incorporar la variación temporal que el ráster promedio no percibe. Para el análisis de sensibilidad, se compararon las producciones hídricas variando entre la ET_0 promedio y el promedio de las ET_0 anuales, utilizando la precipitación anual promedio y manteniendo los demás parámetros iguales a los empleados en el modelamiento inicial, obteniendo una variación de 6,87%.

En conclusión, se observó que el parámetro de profundidad de raíz (root depth) es uno de los menos influyentes en la producción hídrica a comparación de parámetros como “Z” o “Kc”, como se ha evidenciado en estudios previos (Hamel & Guswa, 2015; Redhead et al., 2016).

3.4.3 Calibración

Para calibrar el modelo de producción hídrica anual de InVEST para la microcuenca del río Tona fue necesario correr el modelo un sinnúmero de veces de una manera sistemática, ajustando los parámetros más sensibles que resultaran en un mejor ajuste entre la producción hídrica modelada y la observada. El ajuste se verificó buscando la minimización del error cuadrático medio (RMSE) y del error relativo porcentual entre los valores modelados y los observados (Yang et al., 2019).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Modelado_i - Observado_i)^2}{n}} \quad (9)$$

A diferencia de otras cuencas analizadas con InVEST (Hamel & Guswa, 2015; Minga León, 2018; Redhead et al., 2016; Rosero, 2018), esta cuenca no contaba con estaciones hidrométricas que proporcionaran datos de caudal por subcuenca por lo que se hizo una calibración global del modelo usando datos anuales de volumen de producción hídrica.

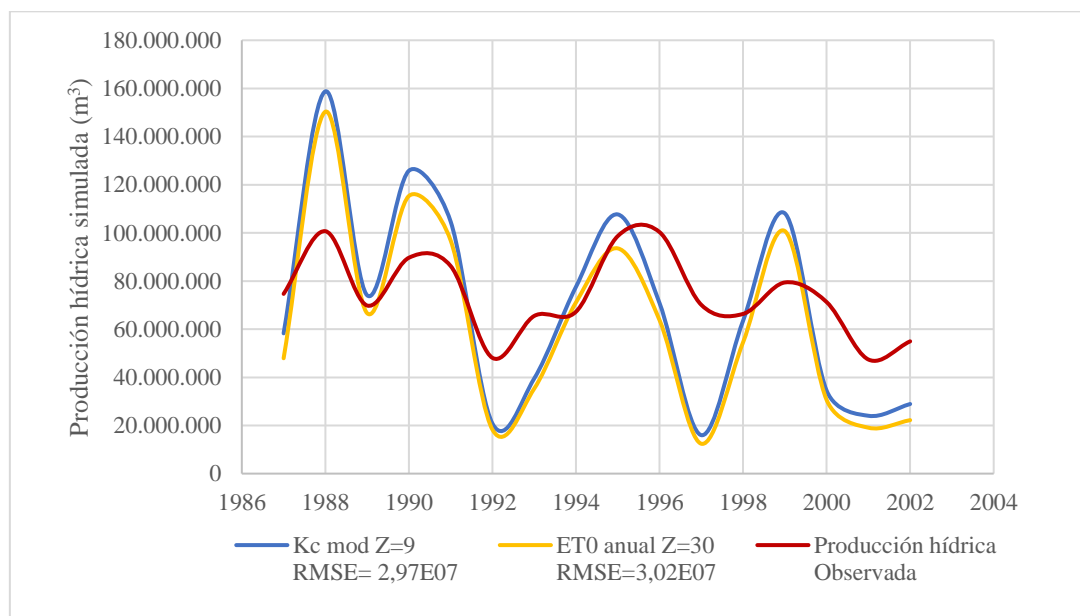
Teniendo en cuenta un estudio previo (Redhead et al., 2016), y el análisis de sensibilidad realizado, se decidió escoger la máxima profundidad de raíz establecida para cada uso de suelo, dejando este parámetro fijo para las corridas posteriores. Para el caso del parámetro Kc, los datos más adecuados para el modelo fueron los obtenidos a partir de la segunda revisión bibliográfica, en la cual se identificaron nuevos valores de Kc mayores a los iniciales para algunos tipos de uso de suelo, para así aumentar la ET real y disminuir la producción hídrica simulada. Esto porque en algunos casos el valor de la producción hídrica obtenida con el máximo valor recomendado por la guía de InVEST (Z=30) era mayor que la observada. Con estos nuevos valores de Kc, los datos de

salida se acercaron ligeramente más que con los datos iniciales de K_c a los datos observados dentro del rango recomendado para Z (utilizando los K_c sin ajustar, se presentan rangos de RMSE entre $2,98E07$ y $9,35E07$, mientras que, usando los K_c ajustados, estos varían entre $2,97E07$ y $8,80E07$ (Ver Apéndices D y E).

El análisis de sensibilidad realizado para ET_0 evidenció que el uso de los ET_0 anuales (Ver Apéndice F) no generó mejoría en la exactitud de las producciones hídricas simuladas con respecto a las obtenidas usando el ráster de ET_0 promedio usado inicialmente; por el contrario, provocaron un ligero aumento en el valor del error (RMSE) calculado, en donde, el menor valor obtenido para ET_0 promedio y ET_0 anuales, fue de $2,97E07$ con $Z=9$ y de $3,02E07$ con $Z=30$, respectivamente. Debido a esto, se optó por utilizar datos promedio de precipitación y ET como lo recomienda el software (Sharp et al., 2020) y utilizar errores porcentuales relativos, calibrando Z para obtener el valor de producción hídrica más cercano al valor observado (Figura 13).

Figura 13

Comparación de las producciones hídricas simuladas con ET_0 promedio y ET_0 anual



Nota. Se comparan los datos usando los valores de Z para los cuales se obtuvo el menor valor de RMSE para cada caso.

En conclusión, los parámetros utilizados para la calibración del modelo fueron: Kc y Z y los rangos usados en la calibración se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7

Variaciones hechas para la calibración del modelo

	Parámetro	Valor inicial	Variaciones hechas
	Z	12	1, 5-10, 15, 20, 25, 30
	BANA	1,1	1,2
	BARR	0,2	0,8
	COFF	1,1	1,1
	FESP	0,42	0,42
	FRSE	0,9	1
	FRST	1	1
Kc	MESQ	0,8	1,2
	ORCD	1,1	1,1
	PINE	1	1
	RNGB	0,75	0,9
	RYEG	1	1,1
	SPAS	0,75	0,9
	SWRN	1,1	1,1
	URBN	0,2	0,7

3.5 Modelamiento de la producción hídrica ante condiciones futuras de uso de suelo y demanda

El modelo calibrado se usó para evaluar la producción hídrica ante condiciones futuras de uso de suelo y demanda. La modelación usó datos anuales promedio de precipitación y *ET* de referencia; se establecieron los escenarios de usos de suelo teniendo como referencia los propuestos por Carrillo Peña (Carrillo Peña, 2018), y se incorporó la demanda del recurso hídrico usando las captaciones máximas posibles con el sistema actual y las captaciones máximas futuras relacionadas con la operación de la planta de tratamiento de agua potable Rafael Ardila Duarte.

Esta infraestructura está localizada en la vereda Angelinos y, una vez en funcionamiento, beneficiará a 110.000 habitantes en más de 50 barrios en los estratos 1, 2 y 3 del Área Metropolitana de Bucaramanga (Acueducto Metropolitano de Bucaramanga, 2021a). Cabe resaltar que la modelación no tuvo en cuenta las captaciones diferentes a las bocatomas ya que las extracciones por uso doméstico y pecuario no exceden el 0.6% de lo captado por estas (Minvivienda, 2021).

Los escenarios establecidos corresponden a un comportamiento del uso de suelo tendencial donde se mantiene la cobertura actual (Escenario tendencial, Tabla 1), uno concertado (combinación de actividades protectoras y productoras), donde se representa una condición de transición natural a rastrojos y cambios a cultivos permanentes, potreros arbolados y algunos bosques plantados (Tabla 8), y uno orientado a una protección más intensa, en el cual varios usos de suelo cambian a bosque (Tabla 9).

Tabla 8

Cambios de uso de suelo. Escenario concertado

Escenario concertado		
Uso Actual	Cambio Uso	Subcuencas
BANA	COFF	1, 8
PAST	MESQ	1, 2, 8, 10, 11, 12, 13
PAST	PINE	6, 7
RNGB	MESQ	1, 4, 6, 7, 8, 12, 13
RYEG	COFF	1, 8
RYEG	MESQ	2, 6, 7, 10, 11
RYEG	RNGB	3, 4, 5
SPAS	MESQ	4, 5
SWRN	MESQ	2, 9, 10

Nota. Tomado de (Carrillo Peña, 2018)

Tabla 9*Cambios de uso de suelo. Escenario protector*

Escenario protector		
Uso Actual	Cambio Uso	Subcuencas
BANA	FRST	1, 8
PAST	FRST	1, 2, 8, 11, 12, 13
RNGB	FRST	1, 4, 5, 6, 7, 8, 12, 13
RYEG	FRST	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 10, 11
SPAS	FRST	4, 5
SWRN	FRST	2, 9, 10

Nota. Tomado de (Carrillo Peña, 2018)

Teniendo en cuenta los escenarios establecidos anteriormente, se modificó el shapefile de uso y cobertura de suelo, cambiando, para cada caso, el dato de la columna *lucode*, que denomina a cada uso de suelo, para posteriormente crear los rásteres con los cuales se corrió el modelo.

Para la implementación de condiciones de demanda futuras, se tuvieron en cuenta los valores de captación máxima actual, de 1400 lps, captación máxima de la primera fase de la planta Rafael Ardila Duarte, de 600 lps, y captación máxima total esperada de la misma planta, de 1200 lps (Acueducto Metropolitano de Bucaramanga, 2021a), obteniendo así los siguientes datos de demanda hídrica total anual (Tabla 10).

Tabla 10*Escenarios de demanda total anual*

Escenario de demanda	Q captado [m3/s]	Demanda total anual [m3/año]
Captación máxima actual	1,4	44.150.400
Captación primera fase de PTAP	2,0	63.072.000
Captación máxima de PTAP	2,6	81.993.600

4. Resultados

4.1 Análisis de sensibilidad y calibración

El análisis de sensibilidad sugirió que los parámetros objeto de la calibración fueron “Z” y “Kc”, por lo que la calibración se basó en la variación de estos parámetros en el rango comprendido entre 1 y 30 para Z, y utilizando los valores de Kc sin ajustar y ajustados (Tabla 7). Se obtuvo que el valor con el cual la producción hídrica promedio simulada se ajustaba más a la producción hídrica promedio observada era Z=7 utilizando los valores de Kc modificados, obteniendo así un error relativo porcentual de 1,18% (Tabla 11).

Tabla 11

Error relativo porcentual de la producción hídrica simulada con respecto a la observada

Prod. hídrica promedio observada (m³)	Prod. hídrica promedio simulada (Z=7) (m³)	% error relativo
74.392.804	75.271.662	1,18%

4.2 Escenarios de uso de suelo y demanda

Se presentan los resultados de producción hídrica total simulada obtenida a partir de los escenarios planteados en la sección 3.5., usando datos de precipitación promedio para la ventana de tiempo y ET de referencia anual promedio (Tabla 12).

Tabla 12

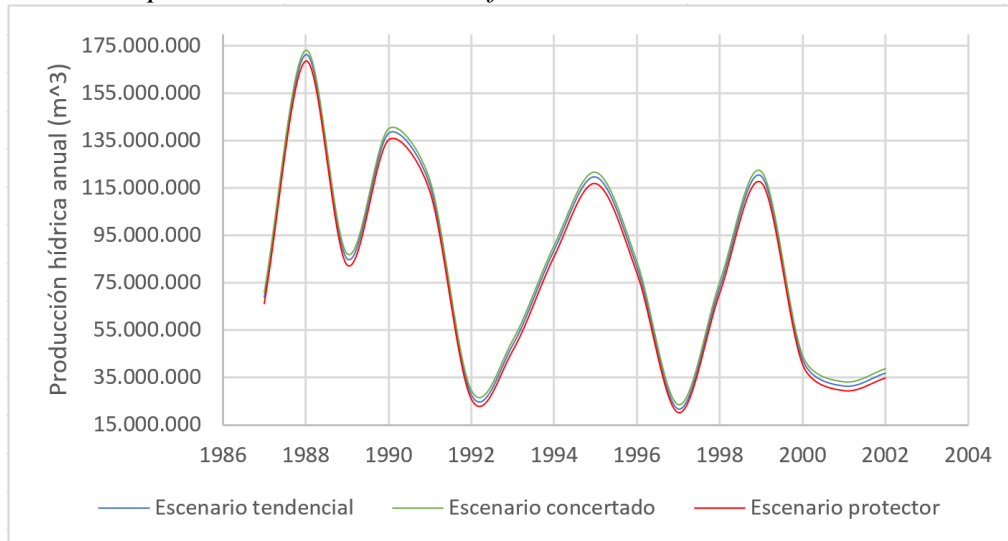
Producciones hídricas ante condiciones futuras de uso de suelo

Escenario de uso de suelo	Producción hídrica total simulada [m³/año]
Actual	75.271.662
Concertado	77.462.603
Protector	72.708.667

Se modeló la producción hídrica para cada año de la ventana de tiempo ante los escenarios de uso de suelo planteados (Figura 14) (Ver Apéndice G).

Figura 14

Valores anuales de producción hídrica ante diferentes condiciones de uso de suelo



La producción hídrica anual promedio por subcuenca (Tabla 13) se distribuye similarmente en los tres escenarios (Figura 15).

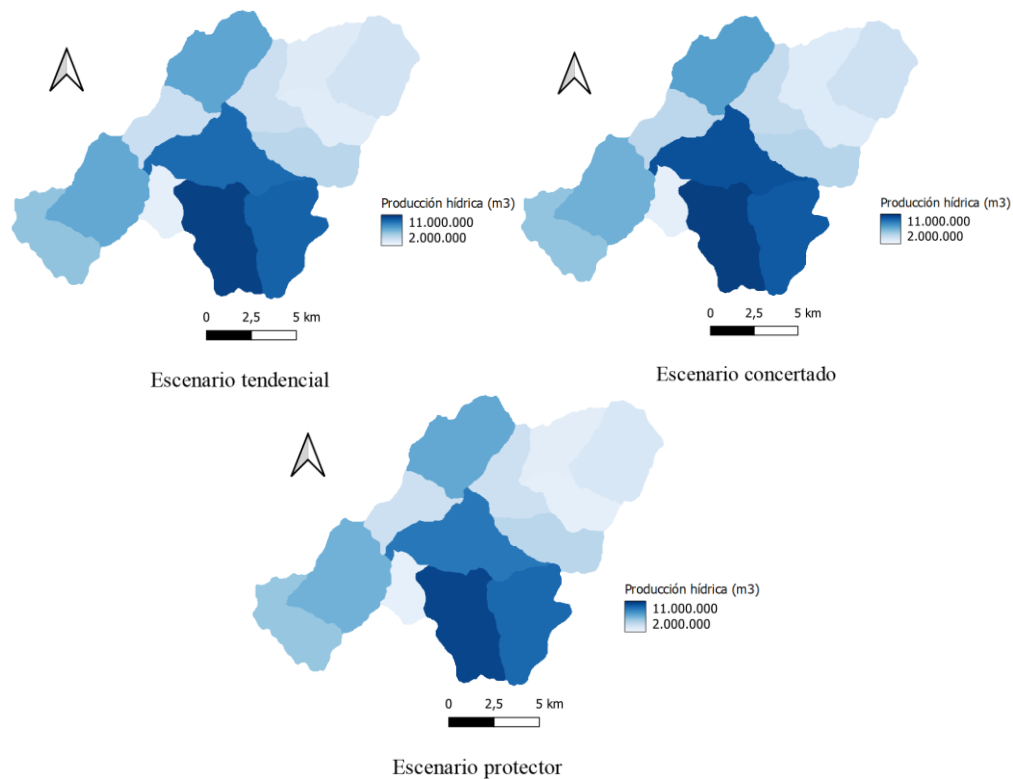
Tabla 13

Producción hídrica por subcuenca para escenarios de uso de suelo

Subcuenca	Producción hídrica [m ³ /año]		
	Tendencial	Concertado	Protector
1	6.948.188	6.598.094	6.573.409
2	9.261.064	10.084.423	8.796.932
3	2.890.562	2.924.798	2.802.347
4	9.562.909	9.819.683	9.344.252
5	10.520.866	10.600.968	10.425.068
6	7.070.637	7.287.685	6.925.404
7	4.206.727	4.652.755	4.027.522
8	5.832.034	5.778.680	5.674.578
9	4.722.237	4.801.149	4.698.079
10	4.116.043	4.386.898	4.030.594
11	3.129.413	3.227.384	2.894.535
12	3.793.015	3.986.417	3.471.880
13	3.184.059	3.262.435	3.014.386

Figura 15

Producción hídrica por subcuenca en los tres escenarios de uso de suelo



Al comparar los resultados de producción hídrica total anual simulada (Tabla 12) con los escenarios de demanda total anual propuestos (44.150.400 m³/año, 63.072.000 m³/año y 81.993.600 m³/año), se puede evaluar la capacidad hídrica de la cuenca ante condiciones críticas de demanda (Tabla 14).

Tabla 14

Caudal de captación adicional máximo posible

Diferencia entre producción hídrica simulada y demanda total anual [m3/s]			
Captación/Escenario	Escenario actual	Escenario 1	Escenario 2
Captación máx actual	0,99	1,06	0,91
Captación primera fase de PTAP	0,39	0,46	0,31
Captación máxima de PTAP	-0,21	-0,14	-0,29

Nota. Las diferencias negativas obtenidas en la tabla indican que la producción hídrica no es capaz de suplir la demanda.

5. Discusión

5.1 Gestión de datos de entrada

Durante la obtención de la información del software, se evidenció que gran parte de los datos de entrada son requeridos en formato ráster por el modelo InVEST, por lo que, a pesar de que estos no se necesitan en una misma resolución espacial, esta última juega un papel importante debido a que ante una baja resolución espacial, como la pueden presentar algunos datos globales, se puede generar una mayor incertidumbre en los datos de salida ya que no se representa detalladamente la información de la región de estudio como sí podría evidenciarse mediante la utilización de datos locales más precisos. Un claro ejemplo de datos globales con baja resolución utilizados en este trabajo fueron los datos de ET de referencia. El uso de estos pudo haber generado imprecisión en la producción hídrica simulada con respecto a la observada, por lo que es recomendable enfatizar en los estudios de análisis de la ET de la cuenca del río Tona con el fin de obtener datos más precisos de este parámetro para estudios posteriores.

Teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente, otro factor que demuestra la necesidad de estudios previos en la región de interés es la baja disponibilidad de valores para parámetros biofísicos como K_c y profundidad de raíz, por lo que, para algunos tipos de uso de suelo, estos fueron estimados utilizando valores de usos de suelo similares, pero en condiciones climáticas diferentes, generando una incertidumbre en su determinación.

Posteriormente, para el procesamiento de la información de entrada del software, es imprescindible tener presente tanto el formato como las unidades requeridas para cada uno de los archivos, ya que en algunos casos es necesario realizar conversiones de unidades y cambios de

formato, que, en caso de no efectuarse, generarían errores significativos en los resultados. Tras esto, puede ser de gran utilidad revisar a detalle los archivos de muestra que ofrece el software y usarlos de referencia para el adecuado procesamiento de los datos de entrada, como por ejemplo la construcción de la tabla biofísica.

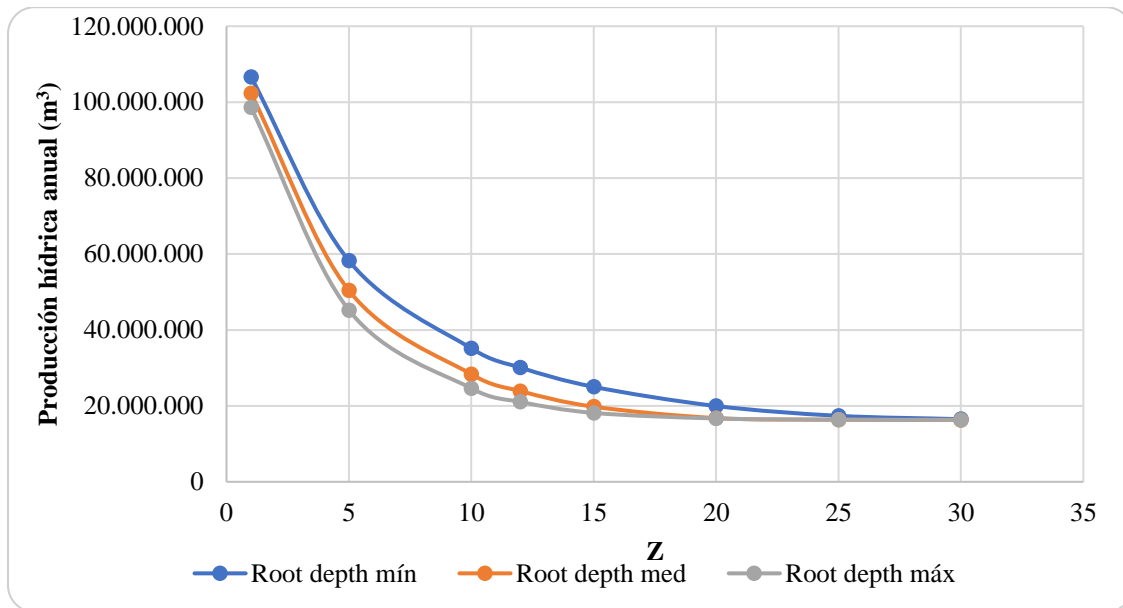
5.2 Análisis de sensibilidad y calibración

En diversos estudios previos se ha observado que uno de los parámetros más sensibles del modelo es la precipitación (Hamel & Guswa, 2015; Redhead et al., 2016; Yang et al., 2019), la cual ha sido utilizada en algunos casos en la etapa de calibración (Rosero, 2018). Sin embargo, para nuestro caso de estudio, al ser la precipitación posiblemente el parámetro más confiable, se decidió que esta permanecería fija, y que parámetros como Z, Kc y root depth, que contaban con mayor incertidumbre, serían incluidos en el análisis de sensibilidad, para posteriormente evaluar su relevancia en la calibración.

A partir del análisis de sensibilidad, con la variación del parámetro root depth se encontró que para los años 1992 y 1997, en los cuales se presentaron las menores producciones hídricas simuladas, se generaron las mayores variaciones de la producción hídrica para valores de Z entre 10 y 15 (Figura 16). Esto indica que para producciones hídricas bajas, el cambio en este parámetro genera una mayor variación porcentual que para producciones hídricas altas, lo cual puede suponer una incertidumbre a la hora de estimar producciones hídricas bajas.

Figura 16

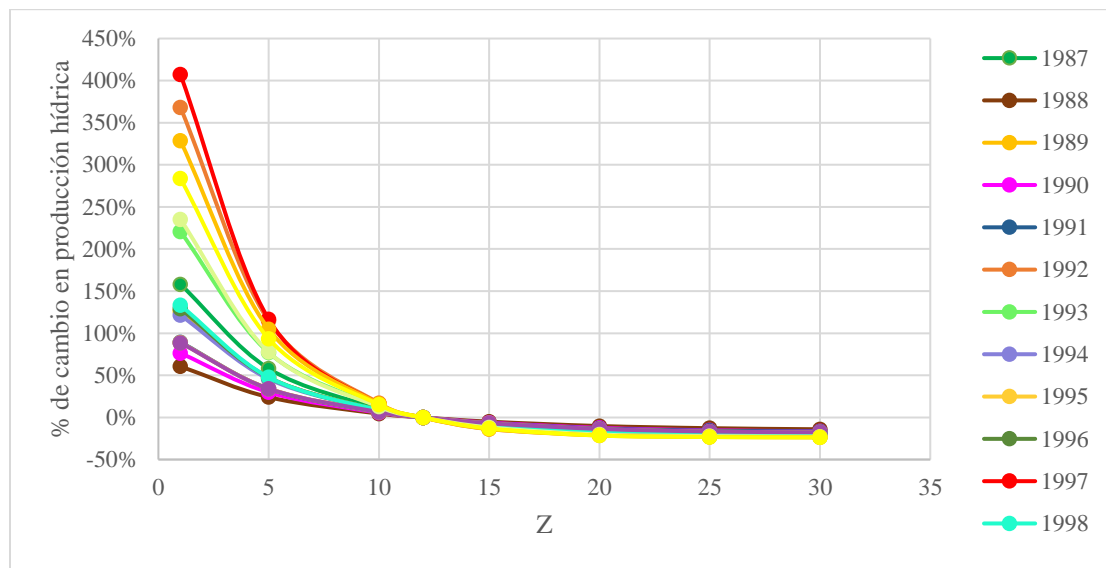
Variación de la producción hídrica simulada ante cambios en la profundidad de raíz



Por otro lado, tras el cálculo del porcentaje de variación de la producción hídrica con el cambio del parámetro Z para los diferentes años del periodo de estudio, y tomando como referencia el resultado de la producción hídrica obtenida en la modelación inicial ($Z=12$), se obtuvieron variaciones desde -23,76% hasta 407,32% (Figura 17), lo que puede indicar que este parámetro tiene una alta sensibilidad en la cuenca del río Tona, a diferencia de lo encontrado en un estudio que analizó la cuenca del río Coca, en el que este parámetro presenta baja sensibilidad (Rosero, 2018), evidenciándose que la sensibilidad de Z depende de la cuenca de estudio (Redhead et al., 2016).

Figura 17

Variación de la producción hídrica ante cambios en el parámetro Z



Después de analizar el comportamiento de la producción hídrica simulada (Figura 17), se encontró que esta es máxima para valores de $Z=1$, disminuyendo a medida que Z aumenta, y también que los cambios entre valores de Z bajos generan una mayor variación en la producción hídrica que los cambios en valores de Z altos. Debido a esto, puede ser recomendable para el análisis de sensibilidad y la calibración, evaluar la producción hídrica entre intervalos pequeños para valores de Z menores a 10 y usar intervalos más amplios para valores de Z mayores.

Posteriormente, durante la etapa de calibración, se evidenció que el comportamiento de la producción hídrica simulada era muy similar al de la precipitación anual, siendo dispersa comparada con la producción hídrica observada, por lo tanto, se decidió implementar rásteres de ET_0 correspondientes a cada año, los cuales, aunque poseían valores menores, posiblemente por su baja resolución espacial, y al parecer, incongruentes con el ráster inicial, contaban con una mejor resolución temporal. Sin embargo, estos no presentaron una mejoría en los resultados, enfatizando una vez más en la necesidad de tener datos más precisos espacial y temporalmente.

Finalmente, ya calibrado el modelo con datos promedio de precipitación y ET , se obtuvo que el valor de Z con el cual la producción hídrica simulada se asemeja a la observada es 7. Al comparar este valor con los obtenidos en otros estudios, se observó que en algunos casos el Z usado para zonas tropicales es muy semejante al obtenido en este estudio, encontrándose valores de 4, recomendado para cuencas tropicales (Arunyawat & Shrestha, 2016; Yudistiro et al., 2019); 5, hallado por calibración (Sahle et al., 2019); y 7, hallado con datos globales de ω (Yang et al., 2019). En zonas no tropicales se encontró que este parámetro ha tomado valores de 14, a través de calibración por subcuencas (Hamel & Guswa, 2015); o de 30, calculado mediante el número de eventos de lluvia (N) ((Redhead et al., 2016).

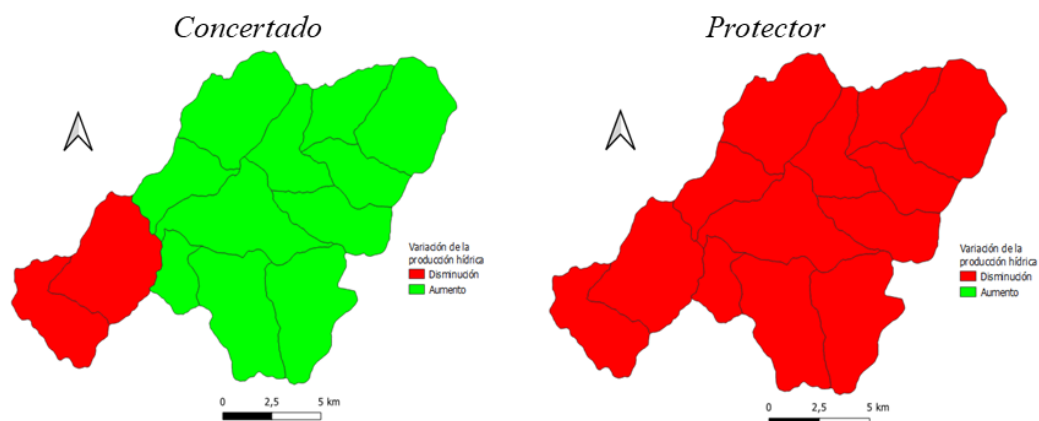
5.3 Escenarios de uso de suelo y demanda

La información obtenida a partir de la modelación de escenarios de uso de suelo permite conocer qué tan significativos fueron los cambios en la producción hídrica.

Adicionalmente, se obtuvieron resultados de producción hídrica por subcuenca para cada uno de los escenarios de uso de suelo (Tabla 13), en los cuales se pudo observar la variación de las producciones hídricas para escenarios futuros con respecto al escenario actual (Figura 18).

Figura 18

Variación de la producción hídrica ante los escenarios de condiciones futuras con respecto al uso de suelo actúa



En el caso de estudio, los escenarios concertado y protector produjeron un porcentaje de cambio de 2.91% y -3.40% respectivamente, que al ser comparados con los obtenidos en el software SWAT (5.88% y 2.88% respectivamente) por Carrillo Peña (Carrillo Peña, 2018), parecen indicar que, de los escenarios planteados, el escenario concertado, correspondiente a transición natural a rastrojos y cambios a cultivos permanentes, potreros arbolados y algunos bosques plantados, es el más conveniente para el aumento de la producción hídrica de la cuenca. El porcentaje de cambio en la producción hídrica con este escenario parece ser leve, sin embargo, este puede llegar a ser significativo en términos de gestión del recurso (Rosero, 2018).

Al realizar un análisis de los resultados obtenidos en la sección 4.2., y del comportamiento de los parámetros que se ven afectados al realizar cambios en los usos de suelo, se puede inferir que para el caso del escenario concertado, la transición de gran parte de usos de suelo a MESQ, generó un aumento general en la producción hídrica de la cuenca, que pudo deberse a la disminución en la profundidad de raíz del uso de suelo. Por el contrario, en el escenario protector se presenta una disminución en la producción hídrica, que pudo deberse a la transición de gran parte de usos de suelo a FRST, ya que esto ocasionó un aumento generalizado en la profundidad de raíz. No obstante, esto también pudo deberse a que el modelo no tiene en cuenta otros parámetros hidroclimáticos que pudieron verse afectados por el cambio de usos de suelo.

Sin embargo, para determinar con certeza el escenario más adecuado para garantizar el recurso hídrico en la cuenca, es necesario llevar a cabo estudios para una mejor caracterización de los parámetros biofísicos de la cuenca, y así conocer, con mayor precisión, la influencia de los cambios de uso de suelo en la producción hídrica de esta.

Por otro lado, al evaluar los escenarios de demanda se evidenció que para la captación máxima esperada de la planta de agua potable Rafael Ardila Duarte, no se garantizaría el

abastecimiento del recurso hídrico para ningún escenario de condiciones futuras de uso de suelo, indicando que la demanda requerida podría exceder la producción hídrica de la cuenca en casos extremos.

6. Conclusiones

Teniendo en cuenta la gestión de los datos de entrada se pudo determinar que los resultados obtenidos a partir de la modelación hidrológica con el módulo de producción hídrica anual de InVEST son dependientes de la precisión de los datos de entrada usados, por lo cual se torna relevante utilizar fuentes de datos confiables, y con resolución espacial y temporal lo suficientemente detallada para poder simular con precisión el comportamiento real de la cuenca. Además, la falta de datos locales que presentan algunos parámetros hace necesario llevar a cabo más estudios con el fin de obtener información para caracterizar adecuadamente las condiciones climáticas y biofísicas de la cuenca.

Observando los datos de producción hídrica obtenidos a nivel de subcuenca para escenarios presentes y futuros, se puede inferir que las de mayor relevancia fueron Tona Alto, El aburrido y Montecristo, debido al alto rendimiento hídrico que estas presentaron. Por otro lado, al analizar los resultados obtenidos en la modelación de escenarios ante condiciones futuras de uso de suelo, se encontró que la transición de SWRN, FRSE y RYEG a MESQ, las cuales representaron los principales cambios propuestos en el escenario concertado, generaron un aumento significativo en la producción hídrica, llegando a ser del 8.89% en la subcuenca Tona Alto. Caso contrario ocurrió con los cambios de uso de suelo propuestos en el escenario protector, donde el uso de suelo predominante fue FRST, que conllevó a una menor producción hídrica. Sin embargo, es fundamental llevar a cabo estudios que permitan una mejor caracterización de los parámetros biofísicos de la cuenca, y de esta forma conocer, con mayor precisión, el efecto producido por los

cambios de uso de suelo en la producción hídrica de esta, para así determinar con certeza el escenario más adecuado para garantizar el recurso hídrico en la cuenca.

Finalmente, al realizar este análisis de viabilidad del modelo de producción hídrica anual de InVEST (Annual Water Yield), se puede evidenciar que este, al ser un modelo muy simplificado, únicamente permite conocer el comportamiento hídrico básico de la cuenca del río Tona, teniendo una previsualización del rendimiento hídrico que se puede llegar a generar. Sin embargo, debido al comportamiento climático bimodal de la región de estudio y al tamaño del área analizada, podría ser adecuado evaluar el desempeño del módulo de producción estacional de agua de InVEST (SWYM), ya que este modelo, a comparación del analizado en este trabajo, presenta un mayor detalle en cuanto a resolución temporal, aunque, cabe resaltar que este presenta un mayor requerimiento de parámetros, los cuales presentan menor disponibilidad.

Bibliografía

- Abbaspour, K. C., Faramarzi, M., Ghasemi, S. S., & Yang, H. (2009). Assessing the impact of climate change on water resources in Iran. *Water Resources Research*, 45(10).
<https://doi.org/10.1029/2008WR007615>
- Abbaspour, K. C., Rouholahnejad, E., Vaghefi, S., Srinivasan, R., Yang, H., & Kløve, B. (2015). A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model. *Journal of Hydrology*, 524, 733-752. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.03.027>
- Acueducto Metropolitano de Bucaramanga. (2017, noviembre 2). Fuentes de Agua. *amb-Gestión Integral del Agua*. http://www.amb.com.co:8081/wp_gestionagua/2017/11/02/fuentes-de-agua/
- Acueducto Metropolitano de Bucaramanga. (2021a, octubre 13). *Plantas de Tratamiento—Amb—Acueducto Metropolitano de Bucaramanga*.
<https://www.amb.com.co/amb/conoce-amb/nuestros-procesos/procesos-operativos/plantas-de-tratamiento/>
- Acueducto Metropolitano de Bucaramanga. (2021b, octubre 21). *Procesos Operativos—Amb—Acueducto Metropolitano de Bucaramanga*. <https://www.amb.com.co/amb/conoce-amb/nuestros-procesos/procesos-operativos/>
- Acueducto Metropolitano de Bucaramanga. (2021c, octubre 21). *Transparencia—Amb—Acueducto Metropolitano de Bucaramanga*. <https://www.amb.com.co/amb/transparencia/>
- Agarwal, S., Patil, J. P., Goyal, V. C., & Singh, A. (2019). Assessment of Water Supply–Demand Using Water Evaluation and Planning (WEAP) Model for Ur River Watershed,

- Madhya Pradesh, India. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series A*, 100(1), 21-32. Scopus. <https://doi.org/10.1007/s40030-018-0329-0>
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56*. <https://www.fao.org/3/x0490e/x0490e00.htm>
- AQUASTAT (FAO). (2021, octubre 30). *Reference evapotranspiration—AgERA5 derived (Global—Annual—~10km)*. <https://data.apps.fao.org/catalog/iso/0f594c49-58a2-4e65-85b9-1f23ce326001>
- Arunyawat, S., & Shrestha, R. P. (2016). Assessing Land Use Change and Its Impact on Ecosystem Services in Northern Thailand. *Sustainability*, 8(8), 768. <https://doi.org/10.3390/su8080768>
- Buytaert, W., Iñiguez, V., Celleri, R., De Bièvre, B., Wyseure, G., & Deckers, J. (2006). Analysis of the Water Balance of Small Páramo Catchments in South Ecuador. En J. Krecek & M. Haigh (Eds.), *Environmental Role of Wetlands in Headwaters* (pp. 271-281). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/1-4020-4228-0_24
- Caetano, J. M., & Casaroli, D. (2016). Tendências dos modelos hidrológicos integrados aos sistemas de informações geográficas a partir da cienciometria/Trends in hydrological models integrated with geographical information systems by scientometric. *Comunicata Scientiae*, 7(3), 406-414. <https://doi.org/10.14295/CS.v7i3.1197>
- Carrillo Peña, G. A. (2018). *Estimación de la producción hídrica para la cuenca del río Tona mediante el modelo hidrológico semidistribuido SWAT*. 93.
- Clerici, N., Cote-Navarro, F., Escobedo, F. J., Rubiano, K., & Villegas, J. C. (2019). Spatio-temporal and cumulative effects of land use-land cover and climate change on two

- ecosystem services in the Colombian Andes. *Science of The Total Environment*, 685, 1181-1192. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.275>
- Donohue, R. J., Roderick, M. L., & McVicar, T. R. (2012). Roots, storms and soil pores: Incorporating key ecohydrological processes into Budyko's hydrological model. *Journal of Hydrology*, 436-437, 35-50. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.02.033>
- Estrada, V., & Pacheco, R. M. (2012). Modelación hidrológica con HEC-HMS en cuencas montañosas de la región oriental de Cuba. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 33(1), 71-80.
- Fu, B. P. (1981). On the calculation of the evaporation from land surface (en chino). *Sci. Atmos. Sin.*, 5, 23-31.
- García, E. (2021). *Los Fondos de Agua*. Fondos de Agua de América Latina. <https://www.fondosdeagua.org/es/los-fondos-de-agua/>
- Gómez, D. F., & Rodríguez, A. D. (2018). *APLICABILIDAD DE DATOS CLIMATOLÓGICOS ESCALADOS PARA LA MODELACIÓN HIDROLÓGICA DE LA CUENCA DEL RÍO TONA EN SANTANDER*. 71.
- González, W. A. (2016). *Análisis de la oferta y demanda para la cuenca del río Guayllabamba, bajo condiciones de sequía*. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/15140>
- Hamel, P., & Guswa, A. J. (2015). Uncertainty analysis of a spatially explicit annual water-balance model: Case study of the Cape Fear basin, North Carolina. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(2), 839-853. <https://doi.org/10.5194/hess-19-839-2015>
- Hengl, T., Mendes de Jesus, J., Heuvelink, G. B. M., Ruiperez Gonzalez, M., Kilibarda, M., Blagotić, A., Shanguan, W., Wright, M. N., Geng, X., Bauer-Marschallinger, B., Guevara, M. A., Vargas, R., MacMillan, R. A., Batjes, N. H., Leenaars, J. G. B., Ribeiro,

- E., Wheeler, I., Mantel, S., & Kempen, B. (2017). SoilGrids250m: Global gridded soil information based on machine learning. *PLOS ONE*, *12*(2), e0169748.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0169748>
- Horton, P., Schaepli, B., & Kauzlaric, M. (2022). Why do we have so many different hydrological models? A review based on the case of Switzerland. *WIREs Water*, *9*(1), e1574. <https://doi.org/10.1002/wat2.1574>
- Izquierdo, A. E., & Clark, M. L. (2012). Spatial Analysis of Conservation Priorities Based on Ecosystem Services in the Atlantic Forest Region of Misiones, Argentina. *Forests*, *3*(3), 764-786. <https://doi.org/10.3390/f3030764>
- Leh, M. D. K., Matlock, M. D., Cummings, E. C., & Nalley, L. L. (2013). Quantifying and mapping multiple ecosystem services change in West Africa. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, *165*, 6-18. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2012.12.001>
- Lüke, A., & Hack, J. (2018). Comparing the Applicability of Commonly Used Hydrological Ecosystem Services Models for Integrated Decision-Support. *Sustainability*, *10*(2), 346. <https://doi.org/10.3390/su10020346>
- Mandle, L. & Natural Capital Project. (2019). *Database of publications using InVEST and other Natural Capital Project software*. <https://purl.stanford.edu/bb284rg5424>
- Minga León, S. V. (2018). *ANÁLISIS DE CAMBIO DEL RENDIMIENTO HÍDRICO ACTUAL Y BAJO ESCENARIOS CLIMÁTICOS FUTUROS EN LA REGIÓN SUR DEL ECUADOR*. <http://ri.uaemex.mx/handle/20.500.11799/99126>
- Minvivienda. (2021). *Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS*. <https://www.minvivienda.gov.co/sites/default/files/documentos/anexo-2-articulado-definitivo-rev-sspd-1.pdf>

- Morales, G. (2019, agosto 6). *Boletín de prensa: Actualizan Aqueduct e identifican los principales países con estrés hídrico*. <https://wrimexico.org/news/bolet%C3%ADn-de-prensa-actualizan-aqueduct-e-identifican-los-principales-pa%C3%ADses-con-estr%C3%A9s-h%C3%ADdrico>
- Nahib, I., Ambarwulan, W., Rahadiati, A., Munajati, S. L., Prihanto, Y., Suryanta, J., Turmudi, T., & Nuswantoro, A. C. (2021). Assessment of the Impacts of Climate and LULC Changes on the Water Yield in the Citarum River Basin, West Java Province, Indonesia. *Sustainability, 13*(7), 3919. <https://doi.org/10.3390/su13073919>
- Ningrum, A., Setiawan, Y., & Tarigan, S. D. (2022). Annual Water Yield Analysis with InVEST Model in Tesso Nilo National Park, Riau Province. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 950*(1), 012098. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/950/1/012098>
- Paul, P. K., Zhang, Y., Ma, N., Mishra, A., Panigrahy, N., & Singh, R. (2021). Selecting hydrological models for developing countries: Perspective of global, continental, and country scale models over catchment scale models. *Journal of Hydrology, 600*, 126561. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126561>
- Pessacg, N., Flaherty, S., Brandizi, L., Solman, S., & Pascual, M. (2015). Getting water right: A case study in water yield modelling based on precipitation data. *Science of The Total Environment, 537*, 225-234. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.07.148>
- Pessacg, N., Flaherty, S., Solman, S., & Pascual, M. (2020). Climate change in northern Patagonia: Critical decrease in water resources. *Theoretical and Applied Climatology, 140*(3), 807-822. <https://doi.org/10.1007/s00704-020-03104-8>

- Ramos, L. (2013). Estudio de la utilidad de la lluvia estimada de satélite en la modelación hidrológica distribuida [Tesis doctoral, Editorial Universitat Politècnica de València]. En *Riunet*. <https://doi.org/10.4995/Thesis/10251/27548>
- Redhead, J. W., Stratford, C., Sharps, K., Jones, L., Ziv, G., Clarke, D., Oliver, T. H., & Bullock, J. M. (2016). Empirical validation of the InVEST water yield ecosystem service model at a national scale. *Science of The Total Environment*, 569-570, 1418-1426. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.06.227>
- Resende, F. M., Cimon-Morin, J., Poulin, M., Meyer, L., & Loyola, R. (2019). Consequences of delaying actions for safeguarding ecosystem services in the Brazilian Cerrado. *Biological Conservation*, 234, 90-99. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2019.03.009>
- Rosero, M. A. (2018). *Análisis del servicio ecosistémico de producción de agua para generación hidroeléctrica en la cuenca del río Coca mediante el uso del software InVEST como sustento para la gestión del recurso hídrico*. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/19166>
- Sahle, M., Saito, O., Fürst, C., & Yeshitela, K. (2019). Quantifying and mapping of water-related ecosystem services for enhancing the security of the food-water-energy nexus in tropical data-sparse catchment. *Science of The Total Environment*, 646, 573-586. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.347>
- Sánchez-Canales, M., López Benito, A., Passuello, A., Terrado, M., Ziv, G., Acuña, V., Schuhmacher, M., & Elorza, F. J. (2012). Sensitivity analysis of ecosystem service valuation in a Mediterranean watershed. *Science of The Total Environment*, 440, 140-153. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.07.071>

- Scordo, F., Lavender, T. M., Seitz, C., Perillo, V. L., Rusak, J. A., Piccolo, M. C., & Perillo, G. M. E. (2018). Modeling Water Yield: Assessing the Role of Site and Region-Specific Attributes in Determining Model Performance of the InVEST Seasonal Water Yield Model. *Water*, *10*(11), 1496. <https://doi.org/10.3390/w10111496>
- Seo, S. B., Das Bhowmik, R., Sankarasubramanian, A., Mahinthakumar, G., & Kumar, M. (2019). The role of cross-correlation between precipitation and temperature in basin-scale simulations of hydrologic variables. *Journal of Hydrology*, *570*, 304-314. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.12.076>
- Sharp, R., Douglass, J., & Wolny, S. (2020). *InVEST User Guide*. <https://storage.googleapis.com/releases.naturalcapitalproject.org/invest-userguide/latest/index.html>
- Srichaichana, J., Trisurat, Y., & Ongsomwang, S. (2019). Land Use and Land Cover Scenarios for Optimum Water Yield and Sediment Retention Ecosystem Services in Klong U-Tapao Watershed, Songkhla, Thailand. *Sustainability*, *11*(10), 2895. <https://doi.org/10.3390/su11102895>
- Su, C., & Fu, B. (2013). Evolution of ecosystem services in the Chinese Loess Plateau under climatic and land use changes. *Global and Planetary Change*, *101*, 119-128. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2012.12.014>
- Tamayo García, G. G. (2017). *Evaluación de los caudales líquidos y de producción de sedimentos estimados con el modelo Soil Water Assessment Tool (SWAT) y su relación con los caudales líquidos y sólidos observados*. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/17067>

- The Nature Conservancy. (2020, noviembre). *Fondos de agua en el mundo*. Water Funds Toolbox. <https://waterfundstoolbox.org/regions/latin-america>
- Tobler, W. (1987). Measuring spatial resolution. *Proceedings, Land Resources Information Systems Conference*, 12-16.
- Trabucco, A., & Zomer, R. (2019). *Global Aridity Index and Potential Evapotranspiration (ET0) Climate Database v2* [Data set]. figshare. <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.7504448.v3>
- Viney, N. R., Bormann, H., Breuer, L., Bronstert, A., Croke, B. F. W., Frede, H., Gräff, T., Hubrechts, L., Huisman, J. A., Jakeman, A. J., Kite, G. W., Lanini, J., Leavesley, G., Lettenmaier, D. P., Lindström, G., Seibert, J., Sivapalan, M., & Willems, P. (2009). Assessing the impact of land use change on hydrology by ensemble modelling (LUCHEM) II: Ensemble combinations and predictions. *Advances in Water Resources*, 32(2), 147-158. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2008.05.006>
- Vogel, R. M., Sieber, J., Archfield, S. A., Smith, M. P., Apse, C. D., & Huber-Lee, A. (2007). Relations among storage, yield, and instream flow. *Water Resources Research*, 43(5). <https://doi.org/10.1029/2006WR005226>
- World Bank. (2017, septiembre 20). *Gestión de recursos hídricos* [Text/HTML]. World Bank. <https://www.bancomundial.org/es/topic/waterresourcesmanagement>
- Yang, D., Liu, W., Tang, L., Chen, L., Li, X., & Xu, X. (2019). Estimation of water provision service for monsoon catchments of South China: Applicability of the InVEST model. *Landscape and Urban Planning*, 182, 133-143. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2018.10.011>

- Yu, X., Lamačová, A., Duffy, C., Krám, P., Hruška, J., White, T., & Bhatt, G. (2015). Modelling long-term water yield effects of forest management in a Norway spruce forest. *Hydrological Sciences Journal*, 60(2), 174-191. Scopus.
<https://doi.org/10.1080/02626667.2014.897406>
- Yudistiro, Kusratmoko, E., & Semedi, J. M. (2019). Water Availability In Patuha Mountain Region Using InVEST Model “Hydropower Water Yield”. *E3S Web of Conferences*, 125, 01015. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912501015>
- Zaks, I. (2019, abril 1). *InVEST* [Text]. Natural Capital Project.
<https://naturalcapitalproject.stanford.edu/software/invest>
- Zhang, L., Hickel, K., Dawes, W. R., Chiew, F. H. S., Western, A. W., & Briggs, P. R. (2004). A rational function approach for estimating mean annual evapotranspiration. *Water Resources Research*, 40(2). <https://doi.org/10.1029/2003WR002710>
- Zheng, Q., Hao, L., Huang, X., Sun, L., & Sun, G. (2020). Effects of urbanization on watershed evapotranspiration and its components in southern China. *Water (Switzerland)*, 12(3). Scopus. <https://doi.org/10.3390/w12030645>

Apéndice

Apéndice A

Tabla Biofísica

lucode	LULC_desc	LULC_veg	root_depth	Kc
1	BANA	1	900	1,1
2	BARR	0	-1	0,2
3	COFF	1	1500	1,1
4	FESP	1	750	0,42
5	FRSE	1	1000	0,9
6	FRST	1	1300	1
7	MESQ	1	700	0,8
8	ORCD	1	600	1,1
9	PINE	1	1500	1
10	RNGB	1	1500	0,75
11	RYEG	1	1000	1
12	SPAS	1	1500	0,75
13	SWRN	1	1000	1,1
14	URBN	0	-1	0,2

Apéndice B

Cálculo del parámetro Z

Año	Número de tormentas por estación					N	Z=N*0,2
	Berlín	Brasil	Galvicia	Tona	UIS		
1987	52	66	69	50	73	62	12,4
1988	61	66	57	50	70	60,8	12,2
1989	67	57	64	40	68	59,2	11,8
1990	61	65	73	29	79	61,4	12,3
1991	57	41	73	35	70	55,2	11,0
1992	65	61	62	45	81	62,8	12,6
1993	61	61	74	45	66	61,4	12,3
1994	67	42	78	53	64	60,8	12,2
1995	49	47	74	63	76	61,8	12,4
1996	61	66	71	60	65	64,6	12,9
1997	54	62	65	58	79	63,6	12,7
1998	55	68	67	63	73	65,2	13,0
1999	60	47	79	53	71	62	12,4
2000	69	48	62	41	68	57,6	11,5
2001	60	57	57	50	72	59,2	11,8
2002	52	64	66	39	75	59,2	11,8
N promedio							12

Apéndice C

Variación entre diferentes profundidades de raíz

Variación root depth	Año	V Z=1	V Z=5	V Z=10	V Z=12	V Z=15	V Z=20	V Z=25	V Z=30
Mín - Med	1987	-2,57%	-8,29%	-11,12%	-11,67%	-12,09%	-11,25%	-9,25%	-4,69%
	1988	-1,35%	-4,28%	-5,36%	-5,43%	-5,35%	-4,91%	-4,26%	-3,54%
	1989	-2,27%	-7,23%	-9,44%	-9,79%	-9,99%	-9,33%	-7,73%	-4,89%
	1990	-1,60%	-5,10%	-6,45%	-6,58%	-6,54%	-6,10%	-5,22%	-4,33%
	1991	-1,85%	-5,75%	-7,22%	-7,36%	-7,31%	-6,66%	-5,50%	-4,14%
	1992	-4,06%	-13,46%	-19,35%	-20,57%	-20,90%	-15,92%	-5,92%	-1,11%
	1993	-3,11%	-10,13%	-13,99%	-14,85%	-15,26%	-13,89%	-8,83%	-3,20%
	1994	-2,20%	-7,04%	-9,23%	-9,58%	-9,77%	-9,18%	-7,70%	-5,42%
	1995	-1,79%	-5,69%	-7,24%	-7,41%	-7,42%	-6,95%	-5,95%	-4,85%
	1996	-2,35%	-7,37%	-9,52%	-9,84%	-9,97%	-9,06%	-7,24%	-4,33%
	1997	-4,58%	-14,49%	-19,95%	-20,66%	-19,64%	-11,88%	-3,05%	-0,49%
	1998	-2,55%	-7,57%	-9,50%	-9,72%	-9,72%	-8,56%	-6,67%	-3,69%
	1999	-1,79%	-5,68%	-7,23%	-7,41%	-7,42%	-6,91%	-5,99%	-4,68%
	2000	-3,41%	-10,83%	-14,60%	-15,19%	-15,36%	-12,94%	-8,02%	-3,58%
	2001	-3,86%	-12,72%	-18,10%	-19,21%	-19,69%	-15,83%	-7,70%	-2,29%
	2002	-3,59%	-11,74%	-16,48%	-17,46%	-17,93%	-15,03%	-8,32%	-2,65%
Promedio		-2,45%	-7,83%	-10,36%	-10,81%	-11,11%	-10,35%	-8,44%	-4,63%
Mín - Máx	1987	-4,84%	-14,11%	-17,96%	-18,56%	-18,22%	-15,37%	-9,76%	-4,69%
	1988	-2,57%	-7,44%	-8,75%	-8,72%	-8,38%	-7,38%	-6,02%	-4,64%
	1989	-4,28%	-12,34%	-15,28%	-15,59%	-15,33%	-13,04%	-9,04%	-4,94%
	1990	-3,05%	-8,82%	-10,50%	-10,54%	-10,25%	-9,01%	-7,29%	-5,21%
	1991	-3,50%	-9,86%	-11,69%	-11,70%	-11,26%	-9,56%	-7,27%	-4,73%
	1992	-7,54%	-22,33%	-29,92%	-30,02%	-27,42%	-16,45%	-5,92%	-1,11%
	1993	-5,83%	-17,09%	-22,36%	-23,02%	-22,10%	-16,72%	-9,07%	-3,20%
	1994	-4,15%	-12,05%	-14,96%	-15,27%	-15,08%	-12,95%	-9,61%	-5,67%
	1995	-3,40%	-9,79%	-11,77%	-11,87%	-11,62%	-10,16%	-8,06%	-5,28%
	1996	-4,42%	-12,54%	-15,35%	-15,56%	-15,09%	-12,45%	-8,31%	-4,36%

1997	-8,45%	-23,66%	-29,73%	-28,73%	-23,88%	-11,94%	-3,05%	-0,49%
1998	-4,77%	-12,79%	-15,18%	-15,26%	-14,54%	-11,64%	-7,35%	-3,70%
1999	-3,40%	-9,77%	-11,76%	-11,86%	-11,58%	-10,12%	-8,03%	-5,25%
2000	-6,36%	-18,12%	-22,86%	-23,00%	-21,58%	-15,78%	-8,54%	-3,61%
2001	-7,18%	-21,19%	-28,20%	-28,60%	-26,51%	-17,46%	-7,78%	-2,29%
2002	-6,69%	-19,64%	-25,88%	-26,41%	-24,74%	-17,33%	-8,40%	-2,65%
Promedio	-4,61%	-13,34%	-16,74%	-17,18%	-16,87%	-14,21%	-9,23%	-4,63%

Apéndice D

Producción hídrica usando datos de Kc sin ajustar (m³)

Año	V Z=1	V Z=5	V Z=10	V Z=12	V Z=15	V Z=20	V Z=25	V Z=30
1987	152.480.125	93.348.126	65.417.310	59.072.776	52.685.161	47.696.769	46.363.564	45.867.144
1988	259.755.389	200.729.383	169.126.513	161.725.623	153.611.203	145.283.250	141.100.349	138.998.517
1989	170.075.614	110.610.579	81.777.482	75.199.183	68.254.714	62.411.521	60.421.816	59.805.695
1990	226.467.387	166.708.123	135.621.756	128.377.535	120.423.874	112.442.984	108.773.759	107.373.826
1991	202.408.414	143.219.203	113.637.534	106.892.986	99.685.334	92.901.433	90.051.548	89.132.855
1992	98.638.966	45.227.312	24.630.271	21.066.406	18.154.237	16.682.552	16.360.263	16.320.993
1993	127.895.120	70.571.605	45.221.784	39.873.106	35.045.320	31.630.935	30.784.858	30.554.513
1994	174.328.532	114.664.443	85.412.248	78.699.036	71.536.853	65.365.515	62.942.486	62.268.452
1995	207.495.661	147.579.902	117.032.531	109.933.939	102.150.554	94.702.882	91.476.440	90.529.884
1996	165.363.347	106.493.417	78.484.813	72.202.488	65.699.548	60.341.192	58.601.643	58.056.784
1997	86.202.391	36.815.529	19.664.328	16.991.584	14.988.939	13.853.505	13.642.046	13.634.007
1998	152.182.289	96.343.162	70.895.604	65.264.154	59.485.768	54.891.600	53.483.830	52.984.393
1999	207.396.056	147.603.734	117.116.796	110.034.727	102.339.256	95.024.716	91.642.502	90.614.928
2000	116.490.803	61.723.081	39.143.010	34.743.050	30.617.754	27.705.357	27.048.599	26.799.988
2001	103.568.839	49.522.518	28.092.123	24.162.486	20.870.247	18.970.764	18.557.005	18.447.528
2002	111.291.047	56.135.542	33.414.029	29.011.300	25.201.374	22.779.885	22.262.531	22.118.421
Promedio	159.344.142	100.092.868	71.839.846	65.421.652	58.824.508	53.487.097	51.958.450	51.419.051

Apéndice E

Producción hídrica usando datos de Kc ajustado (m³)

Año	V Z=1	V Z=5	V Z=10	V Z=12	V Z=15	V Z=20	V Z=25	V Z=30
1987	146.711.865	83.938.886	54.058.073	47.240.495	40.413.963	35.057.729	33.487.477	32.853.398
1988	252.663.808	188.837.497	153.638.609	145.162.762	135.690.989	125.616.539	120.214.786	117.195.152
1989	164.089.346	100.765.435	69.677.780	62.512.048	54.912.557	48.436.291	46.008.524	45.099.816
1990	219.670.406	155.267.719	120.821.634	112.583.923	103.379.879	93.873.078	89.138.321	87.017.950
1991	195.924.902	132.467.430	100.025.690	92.463.556	84.246.177	76.268.948	72.563.153	71.039.982
1992	93.977.022	38.721.538	18.270.742	14.920.391	12.334.170	11.157.939	10.880.051	10.840.603
1993	122.596.623	62.326.572	35.940.037	30.458.338	25.632.771	22.333.339	21.496.004	21.245.229
1994	168.302.174	104.695.308	73.077.034	65.734.017	57.849.409	50.968.882	48.062.658	47.113.905
1995	200.907.979	136.501.282	102.813.465	94.798.852	85.872.790	77.106.392	72.953.706	71.405.307
1996	159.405.945	96.767.738	66.593.629	59.745.062	52.607.355	46.589.930	44.382.450	43.489.869
1997	81.767.540	30.926.292	14.061.261	11.591.870	9.853.694	8.988.388	8.805.605	8.797.065
1998	146.428.963	87.127.401	59.673.722	53.504.683	47.131.024	41.883.918	40.019.612	39.168.348
1999	200.912.217	136.744.820	103.289.966	95.361.241	86.624.517	78.114.176	73.908.620	72.353.538
2000	111.565.038	54.506.794	31.520.383	27.135.559	23.124.104	20.349.149	19.649.366	19.357.198
2001	98.830.675	42.795.622	21.338.650	17.573.181	14.564.615	12.951.459	12.577.107	12.470.654
2002	106.394.635	48.972.646	25.942.202	21.622.797	18.025.501	15.866.276	15.387.211	15.237.803
Promedio	153.495.230	90.531.175	60.227.816	53.299.291	46.178.892	40.376.304	38.530.425	37.779.543

Apéndice F

Producción hídrica con ETO anual (m³)

Año	V Z=1	V Z=5	V Z=10	V Z=15	V Z=20	V Z=25	V Z=30
1987	153.701.790	95.525.491	67.898.300	55.275.138	50.150.433	48.558.508	47.909.851
1988	263.260.653	207.316.989	177.868.728	163.768.863	156.314.532	152.432.447	150.319.466
1989	172.926.108	115.731.340	88.130.590	75.338.563	69.687.091	67.500.574	66.634.571
1990	229.052.242	171.694.412	142.176.171	128.006.149	120.619.741	116.972.787	115.328.065
1991	205.282.478	148.549.946	120.369.396	107.269.838	100.925.679	98.026.201	96.823.858
1992	100.523.772	47.728.309	26.702.282	20.046.972	18.639.269	18.309.589	18.262.322
1993	130.711.655	75.046.713	50.066.218	39.935.857	36.498.988	35.579.453	35.318.059
1994	177.686.210	120.715.435	93.070.946	80.222.587	74.464.473	71.988.913	71.121.415
1995	208.674.425	150.018.720	120.152.771	105.702.767	98.388.525	94.925.098	93.553.733
1996	168.062.230	111.232.687	84.154.732	71.875.527	66.590.490	64.596.283	63.760.878
1997	86.112.646	36.119.356	18.319.142	13.603.146	12.619.251	12.422.729	12.414.122
1998	153.596.515	98.565.082	73.246.930	61.893.459	57.111.303	55.353.260	54.544.857
1999	210.869.518	154.036.832	125.473.422	111.966.357	105.290.127	102.020.872	100.741.021
2000	118.819.180	65.150.729	42.689.104	34.392.135	31.607.457	30.902.184	30.609.002
2001	104.188.382	50.325.518	28.645.726	21.419.025	19.613.367	19.196.500	19.076.581
2002	111.511.744	56.410.051	33.454.390	25.237.078	22.892.680	22.373.610	22.218.132
Promedio	161.377.433	103.705.841	76.158.846	63.495.085	58.138.609	56.341.907	55.591.234

Apéndice G*Valores anuales de producción hídrica ante diferentes condiciones de uso de suelo*

Año	Producción hídrica (m3)		
	Escenario tendencial	Escenario concertado	Escenario protector
1987	68.871.167	71.035.571	66.305.056
1988	171.467.156	173.031.532	168.646.742
1989	85.160.003	87.312.121	82.563.153
1990	138.201.614	139.950.884	135.378.990
1991	116.267.922	118.335.508	113.596.001
1992	27.769.845	29.778.267	26.023.045
1993	48.780.950	50.884.568	46.496.711
1994	88.864.953	90.878.409	86.232.445
1995	119.762.701	121.653.459	116.950.946
1996	81.561.477	83.858.379	79.030.927
1997	21.659.742	23.705.750	20.267.384
1998	73.212.819	75.572.236	70.894.594
1999	120.110.849	122.027.700	117.365.321
2000	42.441.260	44.295.250	40.507.021
2001	31.408.068	33.341.939	29.570.517
2002	36.889.936	38.892.641	34.929.082
Promedio	75.271.663	77.462.603	72.708.667