

CUBHIC 2.0:

DOCUMENTO
METODOLÓGICO:

ZANJAS DE INFILTRACIÓN



Infraestructura Natural

para la Seguridad Hídrica



CUBHIC2.0

Metodologías de cuantificación de
beneficios hidrológicos de intervenciones en cuencas

Autoría:

Boris F. Ochoa-Tocachi^{1,2}

José Cuadros-Adriazola³

Vivien Bonnesoeur³

Producción y cuidado de edición: Gabriel Rojas Guillén¹

Corrección de estilo: Luis Rodríguez Pastor

Diseño y diagramación: Diana La Rosa

Imagen de portada: Ana Castañeda

Editado por: Forest Trends Association

RUC: 20606691204

Av. Ricardo Palma 698, Miraflores

Lima, Peru

Ira edición, agosto 2022

Afiliaciones:

1. Forest Trends; Washington D. C., Estados Unidos

2. ATUK Consultoría Estratégica; Cuenca, Ecuador

3. CONDESAN; Lima, Perú

Esta publicación es posible gracias al generoso apoyo del pueblo de los Estados Unidos de América a través de la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID) y el Gobierno de Canadá. Los contenidos son responsabilidad de los autores y no reflejan necesariamente las opiniones de USAID, ni del gobierno de los Estados Unidos de América ni del Gobierno de Canadá.

Acerca de **CUBHIC 2.0**



La metodología CUBHIC (Cuantificación de Beneficios Hidrológicos de Intervenciones en Cuencas) es una innovación del Proyecto Infraestructura Natural para la Seguridad Hídrica que ofrece una metodología práctica para producir estimaciones cuantitativas de los beneficios hidrológicos de proyectos de infraestructura natural. La versión original de CUBHIC fue desarrollada en colaboración con la firma Kieser & Associates y publicada en 2019¹, considerando las seis intervenciones sobre la infraestructura natural más comunes en el contexto peruano. Esta versión 2.0 de CUBHIC construye sobre el original, presentando varias actualizaciones, cambios y mejoras que hemos encontrado útiles en su aplicación práctica, incluyendo mejoras en los cálculos, en las calculadoras de beneficios y en la presentación².

Este documento proporciona una metodología completa con referencias científicas, la cual ha sido implementada en una Calculadora de Beneficios CUBHIC 2.0 compatible con Excel y similares³. La hoja de cálculo acompaña por separado a este documento para aplicaciones de usuario con casos de prueba específicos. Las calculadoras están implementadas con

interfaces sencillas⁴ que permiten a las y los usuarios ingresar fácilmente datos de campo locales para simular instantáneamente los impactos de sus intervenciones. Las calculadoras incluyen parámetros predeterminados que se pueden calibrar o modificar utilizando información de monitoreo en el sitio del proyecto. De manera recíproca, la aplicación de la metodología CUBHIC 2.0 permite informar cuáles podrían ser los datos más críticos para diseñar sistemas de monitoreo relevantes en el sitio del proyecto.

Las ecuaciones utilizadas en este documento buscan ofrecer un resultado confiable, al tiempo que se busca minimizar la cantidad de datos de entrada requeridos. Si bien existen métodos de modelación hidrológica más complejos para simular los procesos hidrológicos y el transporte de sedimentos, por lo general estos requieren mediciones de campo, una calibración intensiva del modelo y una extensa experiencia del equipo modelador. CUBHIC 2.0 ofrece una versión simplificada —pero robusta— de modelación para el uso de un público interesado amplio.

¹ Foster, M. E., Chen, D., Kieser, M. S., & McLaughlin, D. B. (2019). CUBHIC: Metodologías de cuantificación de beneficios hidrológicos de intervenciones en cuencas. Forest Trends, Lima, Perú.

² Ochoa-Tocachi, B. F., Cuadros-Adriazola, J., Bonnesoeur, V., Román, F., & Gammie, G. (2022). CUBHIC 2.0: Presentación de Metodología. Forest Trends, Lima, Perú.

³ Ochoa-Tocachi, B. F., Cuadros-Adriazola, J., Bonnesoeur, V. (2022). CUBHIC 2.0: Calculadoras de Beneficios. Forest Trends, Lima, Perú.

⁴ Ochoa-Tocachi, B. F., Cuadros-Adriazola, J., Bonnesoeur, V. (2022). CUBHIC 2.0: Manual de Uso. Forest Trends, Lima, Perú.



Foto: Hysha Yashira Palomino Tomaylla

Intervención evaluada

Implementación de zanjias de infiltración

Las zanjias de infiltración son pequeñas trincheras de tierra excavadas siguiendo las curvas de nivel, que tienen por objetivo interceptar, recolectar e infiltrar escorrentía superficial proveniente de terrenos adyacentes ladera arriba. Las zanjias de infiltración pueden utilizarse para retener y manejar la escorrentía superficial y, por ende, reducir la pérdida de suelo pendiente abajo que se asocia con la erosión⁵. De hecho, la construcción de zanjias de infiltración en las laderas es una práctica que se realiza en varias regiones de montaña del mundo y que apunta a aumentar la recarga de acuíferos y a la conservación del suelo y el agua, incrementando su infiltración.

Se espera que las zanjias de infiltración generen beneficios positivos sobre la cantidad y calidad de agua, dependiendo en gran medida de cómo fueron diseñadas para responder a factores hidrológicos y físicos que influyen en la escorrentía y, a su vez, en la erosión del suelo. Esto requiere cuantificar las interacciones entre evapotranspiración, percolación, contenido de humedad y pérdida de suelo. El encharcamiento y saturación en las zanjias de infiltración afectará su capacidad de interceptar agua superficial y, por lo tanto, debe ser abordado por la metodología de cuantificación. En campo, es necesario garantizar el correcto mantenimiento y limpieza de las zanjias para asegurar su desempeño eficiente.

⁵ Locatelli, B., Homberger, J.-M., Ochoa-Tocachi, B. F., Bonnesoeur, V., Román, F., Drenkhan, F., & Buytaert, W. (2020). *Impactos de las zanjias de infiltración en el Agua y los Suelos de los Andes: ¿Qué sabemos?* Forest Trends, Lima, Perú.

Calculando los beneficios



La metodología CUBHIC 2.0 realiza una cuantificación de beneficios potenciales sobre el caudal y la carga de sedimentos en una cuenca o sitio de estudio producto de intervenciones sobre la infraestructura natural². Se utiliza una aproximación conservadora⁶ del balance hídrico para simular la hidrología de los ecosistemas andinos y los impactos de las intervenciones, mientras que sigue siendo válido para otras regiones del mundo. Esta ecuación de balance hídrico divide el caudal total en tres componentes: escorrentía superficial, interflujo y caudal base. La escorrentía superficial resultante se utiliza para calcular la pérdida de suelo por erosión que aporta a la carga de sedimentos.

Para poder cuantificar los impactos de las intervenciones, se ejecutan las ecuaciones de balance hídrico y de pérdida de suelo para un escenario de línea base y para dos escenarios distintos de intervención. La línea base representa el antes (o escenario actual), mientras que los escenarios de intervención representan el después de la implementación.

Múltiples escenarios pueden ser configurados para comparar diversos beneficios de las aplicaciones de las distintas intervenciones sobre la infraestructura natural. Cada escenario tiene un conjunto de entradas específicas para las condiciones que representa, lo que a su vez influye en las salidas del cálculo. Los diferentes escenarios proporcionan combinaciones de diferentes impactos y, en algunos casos, las salidas podrán evidenciar una pérdida de servicios ecosistémicos hídricos. Debido a que se evalúa un conjunto de medidas, las partes interesadas deben utilizar las capacidades comparativas de esta metodología para sopesar los beneficios o pérdidas producidas y, por último, el costo de cada escenario.

Este documento técnico presenta los detalles de los pasos de cálculo propuestos para cuantificar los impactos de la implementación de zanjas de infiltración. Estos pasos se enfocan en dos conjuntos de ecuaciones primarias: una de balance hídrico y otra de pérdida de suelo.

⁶ El término *conservador*, tal como se utiliza aquí, infiere que los beneficios estimados probablemente estén en el extremo inferior del rango de resultados previstos. Esta característica es una consecuencia del universo de beneficios que son factibles de cuantificar usando un método sencillo. Se busca no sobrestimar el valor potencial de la intervención y reconocer la incertidumbre asociada con los diversos supuestos metodológicos. Los estudios de campo locales ayudarán a minimizar esta incertidumbre para representar mejor los resultados esperados.

Ecuación de balance hídrico

Figura 1. Entradas y salidas de balance hídrico para la implementación de zanjas de infiltración.



Fuente: Modificado de Foster et al.¹

La precipitación que cae en un área determinada puede convertirse en escorrentía, retornar a la atmósfera a través de evapotranspiración, infiltrarse en el suelo para llenar los espacios en los poros, transformarse en interflujo o percolarse como agua subterránea. El agua que se percola en la superficie freática local puede fluir lateralmente como caudal base y alimentar el caudal total del curso de agua en evaluación o recargar las aguas subterráneas de acuíferos profundos. Estos procesos hidrológicos se ilustran en la **Figura 1**.

Se espera que se produzca un estancamiento temporal de agua en la base de las zanjas de infiltración. También se espera que la evaporación del agua estancada no sea considerable, pero se incluye una cuantificación más adelante.

Para el cálculo del balance hídrico, la precipitación se puede representar mediante la siguiente ecuación:

$$P = q_o + ET + p + \Delta R_s$$

Donde:

- P: Precipitación (mm).
- q_o: Escorrentía (mm).
- ET: Evapotranspiración (mm).
- p: Percolación (mm).
- ΔR_s: Cambio en el contenido de humedad del suelo (mm).

En la metodología CUBHIC 2.0 es importante configurar los cálculos de los componentes del balance hídrico, de modo que se realicen en el siguiente orden:

- a. Calcular la escorrentía.
- b. Calcular la percolación.
- c. Calcular la evapotranspiración.
- d. Actualizar el balance hídrico en el suelo.

Escorrentía superficial

Uno de los métodos más prácticos y ampliamente utilizados para estimar la generación de escorrentía como indicador de regulación hidrológica es el método de Número de Curva (CN, siglas de Curve Number) del Soil Conservation Service de los Estados Unidos^{7,8}. CN es adimensional (no tiene unidades) y se puede determinar usando tablas de búsqueda combinando información de la cobertura de vegetación y uso del suelo, su estado (pobre, regular, bueno) y el grupo de suelos subyacente⁴.

El valor de CN está en un rango entre 0 a 100, donde 0 corresponde a una generación de escorrentía nula (es decir, el suelo infiltra la cantidad total de agua). Un CN de 100 representa una generación de escorrentía con toda el agua de precipitación entrante (es decir, el suelo no tendría capacidad de retención e infiltración de agua). Mientras mejor sea el estado de conservación y la cobertura vegetal, menor es el CN para representar una mejor capacidad de infiltración y almacenamiento de agua en el suelo y baja generación de escorrentía superficial. Asimismo, mientras más degradado esté el suelo, o la cobertura y uso sean más intervenidos o en peores condiciones, el CN es más alto para representar la generación excesiva de escorrentía y poca capacidad de infiltración.

Entonces, la escorrentía (q_0) generada en cada paso de tiempo (t) es:

$$\text{si } P_{(t)} > 0.05 \cdot S, \quad q_{o(t)} = \frac{(P_{(t)} - 0.05 \cdot S)^2}{P_{(t)} + 0.95 \cdot S}$$

Donde:

- L_2 : Longitud de zanja equivalente (m).
- A_{z2} : Área bruta total cubierta por las zanjas de infiltración (ha).
- L : Longitud pendiente arriba de la zanja (m).

$$A_{z2} = \frac{T}{100} \cdot L_2$$

Donde:

- A_{z2} : Área plana de zanja equivalente (m²).
- T : Ancho superior de la zanja (cm).

⁷ Soil Conservation Service (SCS) (1972). National Engineering Handbook, Section 4: Hydrology. Department of Agriculture, Washington D.C., USA.

⁸ American Society of Civil Engineers (ASCE) (2009). Curve Number Hydrology: State of the Practice. Reston, Virginia, USA.

$$V_z = \frac{A_z}{\left(L + \frac{T}{100}\right)} \cdot y \cdot \frac{(T + b)}{2}$$

Donde:

- V_z : Volumen de zanja equivalente (m^3).
- y : Profundidad de la zanja (cm).
- b : Ancho del fondo de la zanja (cm).

Para calcular el volumen de ingreso de agua a las zanjas de infiltración por escorrentía superficial, se utiliza la escorrentía (q_o) que se genera pendiente arriba de las zanjas utilizando el CN del área total del proyecto y se convierte en volumen de agua:

$$V_{q_o(t)} = \frac{(q_o(t) \cdot \text{área} \cdot 10000)}{1000}$$

Donde:

- t : Paso de tiempo (p.ej., día).
- $V_{q_o(t)}$: Volumen de ingreso de escorrentía hacia la zanja en el tiempo t (m^3).
- $q_o(t)$: Escorrentía antes de la zanja en el paso de tiempo t (mm).
- área: Área total de la zona de estudio del proyecto (ha).

El volumen de agua que ingresa en las zanjas de infiltración se calcula utilizando el área plana de zanja equivalente (A_{z2}):

$$V_{P(t)} = \frac{(P(t) \cdot A_{z2})}{1000}$$

Donde:

- $V_{P(t)}$: Volumen de ingreso de lluvia hacia la zanja en el tiempo t (m^3).
- $P(t)$: Precipitación en el paso de tiempo actual (mm).

Asimismo, se considera un volumen de agua menor que se evapora directamente desde las zanjas de infiltración:

$$V_{ET(t)} = \frac{(ET_{P(t)} \cdot A_{z2})}{1000}$$

Donde:

- $V_{ET(t)}$: Volumen de pérdida de agua por evaporación de la zanja en el tiempo t (m^3).
- $E_{TP(t)}$: Evapotranspiración potencial en el paso de tiempo actual (mm).

Entonces, el agua atrapada por las zanjas de infiltración se determina sumando las entradas y salidas de agua en cada paso de tiempo:

$$V_{z2}(t) = \max(0, V_{qo}(t) + V_P(t) - V_{ET}(t))$$

Donde:

$V_{z2}(t)$: Volumen de agua que ingresaría en la zanja en el tiempo t (m³).

Si el volumen de agua que ingresaría a la zanja es mayor que el volumen de zanja equivalente, hay un desbordamiento de agua desde la zanja hacia la ladera aguas abajo, regresando al sistema hidrológico en forma de escorrentía superficial:

$$q_{oz}(t) = \begin{cases} \text{si } V_{z2}(t) \leq V_z & \text{entonces } q_{oz}(t) = 0 \\ \text{si } V_{z2}(t) > V_z & \text{entonces } q_{oz}(t) = 1000 \cdot \frac{(V_{z2}(t) - V_z)}{\text{área} \cdot 10000} \end{cases}$$

Donde:

$q_{oz}(t)$: Escorrentía después de la zanja en el paso de tiempo t (mm).

Esta escorrentía después de la intercepción de las zanjas (q_{oz}) reemplaza a la escorrentía superficial (q_o) de la región de contribución. Es decir, durante cada paso de tiempo, el agua de escorrentía que es atrapada por las zanjas incrementa la humedad de agua en el suelo y la percolación.

Percolación

La humedad del suelo se modela como un reservorio que puede incrementarse con la precipitación y la infiltración y reducirse con la evapotranspiración, percolación profunda hacia las aguas subterráneas y salidas de interflujo. La humedad del suelo está limitada por dos entradas: capacidad de campo (f_c) y punto de marchitez (w_p). Estos valores normalmente se representan como un porcentaje, y se multiplican por la profundidad de la capa de suelo para obtener un valor en milímetros. Durante cada paso de tiempo del balance hídrico, el agua del reservorio de contenido de humedad en el suelo que exceda la capacidad de campo se convierte en percolación:

$$p_{(t)} = \max(0, R_{s(t-1)} + P_{(t)} - q_{o(t)} - f_c)$$

Donde:

$p_{(t)}$: Percolación en el paso de tiempo actual (mm).

$R_{s(t-1)}$: Contenido de humedad en el suelo en el paso de tiempo previo (mm).

f_c : Capacidad de campo (mm).

El agua que percola fuera de la capa de suelo modelada puede terminar tomando una de varias vías diferentes. Generalmente, puede viajar lateralmente como caudal base subsuperficial o descender como filtración a aguas subterráneas profundas. Casi toda el agua que sigue cualquiera de estas vías volverá a la superficie, aunque en diferentes tiempos que dependen de cuánto tardará el agua en resurgir. Los flujos subsuperficiales y subterráneos son procesos hidrogeológicos complejos que pueden ser difíciles de modelar. Es importante tener en cuenta que el agua percolada no debe considerarse como una pérdida.

Infiltración de agua en el suelo

El contenido de humedad actúa como una limitación para la evapotranspiración y la percolación. La evapotranspiración es limitada cuando el contenido de humedad está en o por debajo del punto de marchitez (w_p), mientras que la percolación es limitada cuando el contenido de humedad está por debajo de la capacidad de campo (f_c) del suelo. El contenido de humedad cambia constantemente a medida que la infiltración, la evapotranspiración, la percolación y la salida de interflujo actúan en el reservorio de contenido de humedad.

Calcular el contenido de humedad en intervalos de tiempo más frecuentes puede producir una salida más exacta. Debido a que el contenido de humedad limita la evapotranspiración y la percolación, la mayor precisión en el cálculo del contenido de humedad corresponderá a una mayor precisión en los cálculos de evapotranspiración y percolación. La evapotranspiración propiamente dicha cambia debido a la radiación solar (una función de la época del año) y la temperatura. En tal sentido, la precisión del cálculo de la evapotranspiración se podría beneficiar también de cálculos en intervalos de tiempo más frecuentes.

Este balance hídrico puede abordar rápidamente varios intervalos de tiempo, considerando que:

$$\Delta R_s(t) = R_s(t) - R_s(t-1) - q_i(t-1)$$

Donde:

- $\Delta R_s(t)$: Cambio en la humedad del suelo en el paso de tiempo actual (mm).
- $R_s(t)$: Contenido de humedad en el suelo en el paso de tiempo actual (mm).
- $q_i(t-1)$: Interflujo en el paso de tiempo previo (mm).

Entonces, la ecuación de balance hídrico puede reordenarse para calcular el contenido de humedad por paso de tiempo, así:

$$R_s(t) = R_s(t-1) + P(t) - q_o(t) - ET(t) - p(t) - q_i(t-1)$$

Donde:

- $ET(t)$: Evapotranspiración en el paso de tiempo actual (mm).



Foto: Infraestructura Natural para la Seguridad Hídrica

Cálculo de evapotranspiración

Índice de área foliar

La evapotranspiración está limitada por la temperatura, la humedad y el punto de marchitez. Estas limitaciones se simplifican de manera que la evapotranspiración: 1) no ocurre durante días en los que la temperatura media está por debajo de 0 °C; y, 2) no puede reducir el reservorio de contenido de humedad por debajo del punto de marchitez. La evapotranspiración se estima calculando, primero, la evapotranspiración potencial (ETP) o la evapotranspiración de referencia, que representa la cantidad de evapotranspiración que el aire puede admitir. ETP se multiplica entonces por un coeficiente r , que depende del índice de área foliar (LAI) para calcular la cantidad de evapotranspiración que realmente ocurre:

$$\text{si } LAI \geq 3, \text{ entonces } r = 1$$

$$\text{caso contrario, } r = 0.35 \cdot \exp(0.35 \cdot LAI)$$

Este coeficiente es utilizado a través de una función que limita la evapotranspiración en función del agua disponible en el suelo, es decir, el exceso de agua en el suelo por sobre el punto de marchitez (w_p):

$$ET_{(t)} = \min \left(ET_{P(t)} \cdot r, 0.8(R_{s(t-1)} + P_{(t)} - q_{o(t)} - p_{(t)} - w_p) \right)$$

Donde:

- $ET_{P(t)}$: Evapotranspiración potencial en el paso de tiempo actual (mm).
- r : Coeficiente que depende del índice área foliar (LAI) (adimensional).
- w_p : Punto de marchitez (mm).

Evapotranspiración potencial

ET_p se calcula aquí aplicando el método de Priestley-Taylor⁹, una serie de cálculos que se describen en la documentación del modelo SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*¹⁰). El método de Priestley-Taylor puede ser escrito como:

$$ET_p = \frac{\alpha_{etp} \cdot \Delta}{\lambda \cdot (\Delta + \gamma)} (H_{net} - G)$$

$$\Delta = \frac{4098 \cdot e_0}{(T + 237.3)^2}$$

$$e_0 = \exp\left(\frac{16.78 \cdot T - 116.9}{T + 237.3}\right)$$

Donde:

- α_{etp} : Coeficiente (1.26).
 - Δ : Pendiente de la curva temperatura-presión de saturación (kPa/°C).
 - T : Temperatura media diaria (°C).
 - e_0 : Presión de vapor de saturación (kPa).
 - λ : Calor latente de vaporización (MJ/kg).
 - γ : Constante psicométrica (kPa/°C).
 - H_{net} : Radiación neta diaria (MJ/m²d).
 - G : Densidad del flujo calorífico hacia el terreno (MJ/m²d).
- Esta es mínima γ , a los efectos de este documento, puede asumirse que es 0.

Radiación solar

Las ecuaciones para la radiación pueden ser complejas y, a los efectos de este marco de trabajo, la radiación se representará por medio de ecuaciones del modelo SWAT (capítulos 1.1 y 2.2) y pueden en general describirse así⁹:

$$H_{net} = (1 - \alpha) \cdot H_{sw} + H_{lw}$$

Donde:

- α : Albedo (fracción adimensional entre 0 y 1); para obtener una lista de valores de albedo para diferentes tipos de terreno y vegetación, se puede consultar una tabla de búsqueda¹¹.
- H_{sw} : Radiación solar de onda corta.
- H_{lw} : Radiación solar de onda larga.

⁹ Priestley, C. H. B. & Taylor, R. J. (1972). *On the Assessment of Surface Heat Flux and Evaporation using Large-scale arameters*. Monthly Weather Review, 100: 81-92.

¹⁰ Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R. & Williams, J. R. (2011). *Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009*. Texas Water Resources Institute.

¹¹ Gao, F., et al. (2005). *MODIS bidirectional reflectance distribution function and albedo climate modeling grid products and the variability of albedo for major global vegetation types*. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 110: D01104.

La radiación de onda larga, tal como se utiliza en las ecuaciones SWAT, es una función de la temperatura y de la cobertura de nubes. Las numerosas ecuaciones que SWAT describe pueden simplificarse en una sola ecuación¹, de manera que:

$$H_{lw} = \frac{c}{0.8} (0.00376 \cdot T^2 - 0.0516 \cdot T - 6.967)$$

Donde:

- c. Fracción de la cobertura nubosa adimensional (0.5 – 0.8), que es más baja en caso de una cobertura nubosa más densa y es más alta en caso de que no haya una cobertura de nubes. Si no se cuenta con datos sobre la cobertura nubosa, puede utilizarse un valor medio de 0.65.
- T. Temperatura media diaria (°C).

La radiación de onda corta, tal como se utiliza en las ecuaciones SWAT, es una función de la latitud, el día juliano y la cobertura de nubes. Estas ecuaciones pueden utilizarse tal como se describe en la documentación de SWAT. En su lugar, pueden utilizarse las simplificaciones obtenidas empíricamente que se describen a continuación¹:

$$H_{sw} = \frac{c}{0.8} (a \cdot \delta^2 + b \cdot \delta + d)$$

Donde:

- a: Coeficiente a = $7.6 \cdot 10^{-7} \phi^4 + 0.00607 \cdot \phi^2 - 14.639$.
- b: Coeficiente b = $-3.83 \cdot 10^{-5} \phi^3 + 0.805 \cdot \phi$.
- d: Coeficiente d = $-0.0042 \cdot \phi^2 + 29.913$.
- φ: Latitud (°), positivo si es latitud norte y negativo si es latitud sur.
- δ: Declinación solar, $\delta = 0.409 \sin \left(\frac{2\pi(\text{día} - 82)}{365} \right)$, donde el día es día juliano, es decir, al 1 de enero le corresponde el valor de 1 y sucesivamente.

Evapotranspiración real

Si bien estas ecuaciones ofrecen una estimación adecuada de la evapotranspiración en la zona de estudio, un análisis de sensibilidad de la metodología CUBHIC determinó que es recomendable utilizar datos de evapotranspiración más precisos¹². Esto se puede lograr utilizando mediciones de variables climáticas o estaciones meteorológicas cercanas, o productos procesados específicos para el cálculo de la evapotranspiración como datos climáticos de entrada. Una de las bases de datos recomendadas para este fin es PISCO Evapotranspiración generada por el SENAMHI y el proyecto INSH¹³.

¹² Ochoa-Tocachi, B. F. (2020). Análisis de sensibilidad de las metodologías CUBHIC. Forest Trends, Lima, Perú.

¹³ Huerta, A., Bonnesoeur, V., Cuaros-Adriazola, J., Gutierrez, L., Ochoa-Tocachi, B. F., Román-Dañobeytia, F., & Lavado-Casimiro, W. (2021). A reference evapotranspiration gridded database based on FAO Penman-Monteith in Peru during 1981-2016. Forest Trends, Lima, Perú. Datos disponibles en: https://figshare.com/collections/A_reference_evapotranspiration_gridded_database_based_on_FAO_Penman-Monteith_in_Peru_during_1981-2016/5633182

Evapotranspiración después de las zanjas de infiltración

La evapotranspiración total después de las zanjas (ET_z) es:

$$ET_{z(t)} = ET_{(t)} + 1000 \cdot V_{ET(t)} \cdot \frac{\text{área}}{10000}$$

Donde:

$ET_{z(t)}$: Evapotranspiración total después de las zanjas en el paso de tiempo t (mm).

$ET_{(t)}$: Evapotranspiración antes de las zanjas en el paso de tiempo t (mm).

Enrutamiento de caudal

Interflujo

Luego del cálculo de la percolación, el agua almacenada en el suelo puede generar también interflujo (flujo subsuperficial en la zona no saturada) en función del agua disponible en el suelo, es decir, el exceso de agua en el suelo por sobre el punto de marchitez (wp). El interflujo (q_i) se calcula utilizando una ecuación exponencial¹⁴:

$$q_{i(t)} = (R_{s(t)} - wp) \cdot (1 - \exp(-\alpha_i))$$

Donde:

$q_{i(t)}$: Interflujo en el paso de tiempo actual (mm).

α_i : Coeficiente de interflujo (1/día).

El coeficiente α_i depende del tiempo de residencia del interflujo definido en los parámetros de entrada y se calcula como:

$$\alpha_i = \frac{\ln 2}{\tau_i}$$

Donde:

τ_i : Tiempo de residencia del interflujo (día).

La forma de esta ecuación representa que en cada intervalo de tiempo τ_i el reservorio de agua en el suelo sería vaciado a la mitad debido a la salida de interflujo, si es que no se producen ingresos nuevos de agua por infiltración, por ejemplo, durante periodos prolongados de sequía o de estiaje.

¹⁴ Ochoa-Tocachi, B. F., Alemie, T. C., Guzman, C. D., Tilahun, S. A., Zimale, F. A., Buytaert, W., & Steenhuis, T. S. (2019). Sensitivity analysis of the parameter-efficient distributed (PED) model for discharge and sediment concentration estimation in degraded humid landscapes. *Land Degradation and Development*, 30: 151-165.

Caudal base

El agua almacenada en el reservorio subsuperficial puede generar caudal base (flujo subterráneo en la zona saturada) en función del agua disponible en el acuífero que drena por gravedad, es decir, el exceso de agua por sobre la capacidad de campo (fc). El caudal base (q_b) se calcula utilizando una ecuación exponencial¹³:

$$q_b(t) = (R_b(t) - fc) \cdot (1 - \exp(-\alpha_b))$$

Donde:

$q_b(t)$: Caudal base en el paso de tiempo actual (mm).

α_b : Coeficiente de caudal base (1/día).

El coeficiente α_b depende del tiempo de residencia del caudal base definido en los parámetros de entrada y se calcula como:

$$\alpha_b = \frac{\ln 2}{\tau_b}$$

Donde:

τ_b : Tiempo de residencia del caudal base (día).

La forma de esta ecuación representa que en cada intervalo de tiempo τ_b el reservorio de agua subsuperficial sería vaciado a la mitad debido a la salida de caudal base, si no se produjeran ingresos nuevos de agua por percolación profunda, por ejemplo, durante periodos prolongados de sequía o de estiaje.

Caudal total

El caudal total simulado (Q_{sim}) se calcula sumando la escorrentía superficial (q_o), el interflujo (q_i) y el caudal base (q_b):

$$Q_{sim}(t) = q_o(t) + q_i(t) + q_b(t)$$

Donde:

$Q_{sim}(t)$: Caudal total simulado en el paso de tiempo actual (mm).

Ecuación de pérdida de suelo

Las ecuaciones de pérdida de suelos utilizan la escorrentía después de la intercepción de las zanjas ($q_{o,z}$) para cuantificar la carga y concentración de sedimentos y así ofrecer una estimación del potencial de las zanjas de infiltración para reducir la erosión.

Ecuación USLE

La pérdida de suelos asociada con la escorrentía terrestre a menudo se calcula a partir de ecuaciones de estimación desarrollados originalmente en los Estados Unidos durante las últimas décadas. Desde entonces, se han utilizado en otras aplicaciones internacionales. Estas ecuaciones se basan en la ecuación universal de pérdida de suelo (USLE, por sus siglas en inglés) o una variación de esta, como MUSLE, MUST o USLE-M. Estas variaciones se han desarrollado para mejorar la precisión de la ecuación USLE debido a su tendencia a sobreestimar la pérdida de suelo para pequeños eventos de precipitación y subestimar la pérdida de suelo para grandes eventos de precipitación¹⁵.

Estas variaciones de la ecuación USLE introducen un componente a la ecuación que toma en cuenta la escorrentía. MUSLE y MUST son utilizados por modelos hidrológicos populares como SWAT y APEX (Agricultural Policy/ Environmental Extender Model), pero no son aptos para evaluaciones de intervenciones sobre la infraestructura natural, escasas en datos debido a la mayor demanda de entradas adicionales y a la complejidad de los cálculos requeridos. La ecuación USLE-M requiere solo entradas estándar de la ecuación USLE, así como los volúmenes de escorrentía y precipitación ya necesarios para la ecuación de balance hídrico propuesta en las metodologías CUBHIC. Si bien el modelo SWAT no es usado en este documento, algunos de sus cálculos relevantes (p.ej., factores $L \cdot S$ y evapotranspiración) sí lo son¹⁷.

La ecuación USLE estándar es la siguiente¹⁸:

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C$$

Donde:

- A: Pérdida de suelo (ton/ha).
- R: Factor de erodabilidad por acción de la lluvia (MJ mm/ha h).
- K: Factor de erodabilidad del suelo (t h / MJ mm).
- L: Factor de longitud de la pendiente (adimensional).
- S: Factor de inclinación de la pendiente (adimensional).
- C: Factor de gestión de la cubierta (adimensional).

¹⁵ Kinnell, P.I.A. (2005). *Why the Universal Soil Loss Equation and the Revised Version of it do not Predict Event Erosion Well*. Hydrological Processes, 19: 851-854.

¹⁶ Foster, M. E., Chen, D., & Kieser, M. S. (2019). Crosscut Analysis of Quantification Methodologies for Intervention-Benefits. Final Technical Memorandum by Kieser & Associates, LLC, Kalamazoo, Michigan USA, elaborado para Forest Trends, Washington, D.C., USA.

¹⁷ Texas A&M University (2019). *Soil & Water Assessment Tool (SWAT)*. Disponible en: <https://swat.tamu.edu/software/>.

¹⁸ Renard, K. G., Foster, G. R., Weesies, G. A., McCool, D. K., & Yoder, D. C. (1997). *Predicting Soil Erosion by Water: a Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)*. Vol. 703. Departamento de Agricultura de Estados Unidos de América. Washington, D.C., USA.

Ecuación USLE-M

La ecuación USLE-M es como se indica a continuación¹⁹:

$$A = R_{UM} \cdot K_{UM} \cdot LS \cdot C$$

Donde:

K_{UM} : Factor ajustado de erodabilidad del suelo (USLE-M).

R_{UM} : Factor de erodabilidad por acción de la lluvia (USLE-M).

$$R_{UM} = \frac{R \cdot q_o}{P}$$

y:

q_o : Escorrentía (mm).

P : Precipitación (mm).

La ecuación USLE-M se desarrolló bajo las mismas condiciones experimentales que se utilizaron para desarrollar la ecuación USLE. Los factores L, S y C no tienen unidades y tienen un valor de uno (1) bajo ciertas condiciones experimentales. El factor A es igual para la ecuación USLE y USLE-M para cualquier terreno bajo estas condiciones. Algún ajuste que se haga a R debe ser compensado por un ajuste que se haga a K, de forma que²⁰:

$$A = R \cdot K = R_{UM} \cdot K_{UM}$$

$$K_{UM} = \frac{K \cdot R}{R_{UM}}$$

El factor R depende del volumen e intensidad de la precipitación, así como de los cambios entre un evento y otro. Por lo tanto, para hallar K_{UM} para una ubicación donde K, R, q_o y P son conocidos, K_{UM} podrá calcularse así:

$$K_{UM} = K \frac{\sum_1^n R}{\sum_1^n R_{UM}}$$

Donde:

n: Número de eventos de precipitación que están disponibles para el factor R.

¹⁹ Kinnell, P. I. A. & Risse, L. M. (1998). USLE-M: Empirical Modeling Rainfall Erosion through Runoff and Sediment concentration. Soil Science Society of America Journal 62: 1667-1672.

²⁰ Kinnell, P. I. A. (1998). Converting USLE soil erodibilities for use with the QREI30 index. Soil and Tillage Research 45: 349-357.

Factor R

Para un evento de tormenta individual, el factor R puede determinarse así^{17,21}:

$$R = I_{30} \sum_{1}^m (e_m \cdot v_m)$$

Donde:

I_{30} : Intensidad máxima de la precipitación en un intervalo de 30 minutos (mm/h) durante una tormenta.

m : Partes en las que se divide una tormenta, donde cada parte es una intensidad de precipitación constante.

v_m : Precipitación (mm) durante la parte m .

e_m : Energía unitaria durante la parte m :

$$e_m = 0.29 \cdot (1 - 0.72 \cdot \exp(-0.05 \cdot i_m))$$

Siendo:

i_m : Intensidad de la precipitación (mm/h) durante la parte m .

Dado que la ecuación requiere una resolución temporal alta de datos de precipitación (intradiaria), es posible que los usuarios tengan dificultades de escasez de datos. Usualmente los datos de precipitación más accesibles están disponibles en intervalos temporales de 24 horas. Por lo tanto, el balance hídrico utilizado en este documento, y en el método de número de curva SCS que emplea para calcular la escorrentía, funciona con este paso de tiempo. El método de número de curva SCS se desarrolló utilizando distribuciones de tormenta de diseño de 24 horas²². Cuando se aplica esta distribución de tormenta a un valor de precipitación de tal tiempo, el factor R puede calcularse aplicando únicamente el valor de precipitación de 24 horas²³. Al repetir este método para distintas profundidades de precipitación, se estableció la siguiente relación:

$$R = 0.0526 \cdot P^{2.218}$$

Puesto que $RUM = R \cdot \frac{q_o}{P}$, las dos ecuaciones pueden simplificarse de manera que:

$$R_{UM} = 0.0526 \cdot q_o \cdot P^{1.218}$$

²¹ Para Perú, SENAMHI ha trabajado en un producto disponible: <https://idsep.senamhi.gob.pe/dhi-idf/>

²² USDA-NRCS (2004). National Engineering Handbook: Part 630 – Hydrology. USDA Soil Conservation Service. Washington, D.C., USA.

²³ Froehlich, D. C. (2009). NRCS Design Storm Erosivity. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 135: 76–86.

Factor K

Es importante señalar que normalmente los factores K para la ecuación USLE se encuentran en unidades del sistema imperial, habitualmente utilizado en los Estados Unidos, en contraposición con las unidades métricas que se utilizan en el Sistema Internacional (SI). Los factores K utilizados en el sistema imperial de unidades deben multiplicarse por 0.1317 para obtener la ecuación USLE-M en unidades métricas. Este ajuste debe efectuarse de manera adicional al que se requiere para convertir USLE K a KUM, tal como se describió anteriormente.

El factor K puede calcularse si el tamaño del diámetro medio de las partículas está disponible (lo que puede estimarse si se conoce el tipo de suelo) con la siguiente ecuación :

$$K = 0.0258 + 0.308 \cdot \exp\left(\frac{\log(d_p) + 1.659}{1.004}\right)^2$$

Donde:

d_p : Diámetro medio de las partículas (mm).

A manera de ejemplo, asumiendo que el diámetro medio de las partículas de suelo es 0.01, el factor K sería 0.30. Asumiendo que $\sum R = 32$ y $\sum R_{UM} = 8$, el K ajustado sería 4. El factor métrico KUM sería entonces $0.1317 \cdot 4 \cdot 0.30 = 0.158$.

Factores L·S

Los factores L y S pueden considerarse juntos como un solo factor topográfico calculado así⁹:

$$L \cdot S = \left(\frac{\lambda}{22.1}\right)^m \cdot (65.41 \cdot \sin^2 \theta + 4.56 \cdot \sin \theta + 0.065)$$

Donde:

λ : Longitud de la pendiente (m).

m: Factor de potencia:

$$L \cdot S = \left(\frac{\lambda}{22.1}\right)^m \cdot (65.41 \cdot \sin^2 \theta + 4.56 \cdot \sin \theta + 0.065)$$

siendo:

θ : Ángulo de la pendiente en radianes:

$$\theta = \arctan s$$

y:

s: Pendiente (m/m).

La longitud de la pendiente cambia con frecuencia a lo largo de una pendiente, así como a través de la cuenca. Puede resultar difícil realizar un cálculo con precisión usando un software de teledetección y, con frecuencia, no es factible llevar a cabo la medición en campo. Se puede asumir un valor de 22.1 por defecto¹, prácticamente eliminando el primer término de la ecuación L·S.

Factor C

El factor C de gestión de la cobertura es un coeficiente adimensional de la ecuación USLE que va de 0 a 1, y está determinado por el tipo y densidad de la vegetación y material que está presente en la zona de estudio. Vegetación más densa y más alta, así como una capa de hojas más gruesa o residuos en el terreno, guardan correspondencia con factores C más bajos.

Factores C, por lo general, se calculan usando el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI, por sus siglas en inglés) o a través de tablas de búsqueda. Benavidez et al.²⁴ presentan un resumen excepcional de diversos métodos que pueden ser utilizados fuera de Estados Unidos. A diferencia del factor K, el factor C no requiere ajustes métricos para la ecuación USLE-M.

Ecuación simplificada

La mayoría de los componentes de USLE-M no son variables entre los pasos de tiempo y pueden considerarse constantes una vez establecidos para una ubicación determinada. Estos se pueden condensar en una sola constante para simplificar la ecuación utilizada durante los pasos de tiempo, de manera que:

$$A = U \cdot q_o \cdot P^{1.218}$$

Donde:

$$U = 0.0526 \cdot K_{UM} \cdot L \cdot S \cdot C$$

Concentración de sedimentos

La concentración de sedimentos en el agua (c_{sim}) se calcula dividiendo la carga de sólidos por pérdida de suelo (A) para el caudal total simulado (Q_{sim}), y realizando la conversión de unidades correspondiente¹³:

$$c_{sim(t)} = 1E5 \cdot \frac{A_{(t)}}{Q_{sim(t)}}$$

Donde:

$c_{sim(t)}$: Concentración de sedimentos simulada en el paso de tiempo actual (g/m^3).

$A_{(t)}$: Pérdida de suelo en el paso de tiempo actual (ton/ha).

$Q_{sim(t)}$: Caudal total simulado en el paso de tiempo actual (mm).

Costos de implementación de zanjas de infiltración

La implementación de zanjas de infiltración considera costos de (i) remoción de vegetación y (ii) excavación de las zanjas.

Los costos de remoción de vegetación se calculan para el área plana de zanja equivalente cubierta por las zanjas de infiltración (A_{z2}):

$$D_{rem} = A_{z2} \cdot costo_{rem}$$

Donde:

D_{rem} : Costos de remoción de vegetación del área de las zanjas (USD).
 $costo_{rem}$: Costo unitario de remoción de vegetación (USD/m²).

El volumen de excavación de las zanjas de infiltración corresponde al volumen de zanja equivalente (V_z), de lo cual se desprenden los costos de excavación:

$$D_{exc} = V_z \cdot costo_{exc}$$

Donde:

D_{exc} : Costos de excavación de las zanjas (USD).
 $costo_{exc}$: Costo unitario de excavación (USD/m³).

Finalmente, los costos de la intervención se calculan sumando estos dos componentes:

$$D_{int} = D_{rem} + D_{exc}$$

Donde:

D_{int} : Costos de la intervención por implementación de zanjas de infiltración (USD).

Los costos totales del escenario se calculan sumando los costos por cambio de cobertura del suelo y los costos por la implementación de las zanjas de infiltración.

Resumen del documento

El proceso descrito en este documento para calcular las salidas hidrológicas y de pérdida de suelos para cada paso de tiempo se resume en la **Tabla I**.

Tabla I. Resumen del proceso empleado para calcular las salidas hidrológicas y de pérdida de suelos.

| | |
|--|--|
| Esorrentía (q_o) | $\text{si } P_{(t)} > 0.05 \cdot S, \quad q_{o(t)} = \frac{(P_{(t)} - 0.05 \cdot S)^2}{P_{(t)} + 0.95 \cdot S}$ $\text{de lo contrario,} \quad q_{o(t)} = 0$ |
| Volumen de agua atrapada en las zanjas de infiltración (V_{z2}) | $V_{z2(t)} = \max(0, V_{q_o(t)} + V_{P(t)} - V_{ET(t)})$ |
| Esorrentía luego de la intercepción por las zanjas de infiltración ($q_{o,z}$) | $\text{si } V_{z2(t)} \leq V_z, \quad q_{o_z(t)} = 0$ $\text{si } V_{z2(t)} > V_z, \quad q_{o_z(t)} = 1000 \cdot \frac{(V_{z2(t)} - V_z)}{\text{área} \cdot 10000}$ |
| Percolación (p) | $p_{(t)} = \max(0, R_{s(t-1)} + P_{(t)} - q_{o_z(t)} - fc)$ |
| Evapotranspiración potencial (ET_p) | $\text{si } T_{(t)} > 0, \quad ET_{P(t)} = \frac{\alpha_{etp} \cdot \Delta}{\lambda \cdot (\Delta + \gamma)} ((1 - \alpha) \cdot H_{sw} + H_{lw})$ $\text{de lo contrario,} \quad ET_{P(t)} = 0$ |
| Ajuste de ET por punto de marchitez | $ET_{(t)} = \min(ET_{P(t)} \cdot r, 0.8(R_{s(t-1)} + P_{(t)} - q_{o_z(t)} - p_{(t)} - wp))$ |
| Evapotranspiración después de las zanjas de infiltración (ET_z) | $ET_{z(t)} = ET_{(t)} + 1000 \cdot V_{ET(t)} \cdot \frac{\text{área}}{10000}$ |
| Balance hídrico en el suelo (R_s) | $R_{s(t)} = R_{s(t-1)} + P_{(t)} - q_{o_z(t)} - ET_{z(t)} - p_{(t)} - q_{i(t-1)}$ |
| Interflujo (q_i) | $q_{i(t)} = (R_{s(t)} - wp) \cdot (1 - \exp(-\alpha_i))$ |
| Reservorio subterráneo (R_b) | $R_{b(t)} = R_{b(t-1)} + p_{(t)} - q_{b(t-1)}$ |
| Caudal base (q_b) | $q_{b(t)} = (R_{b(t)} - fc) \cdot (1 - \exp(-\alpha_b))$ |
| Caudal total (Q_{sim}) | $Q_{sim(t)} = q_{o_z(t)} + q_{i(t)} + q_{b(t)}$ |
| Pérdida de suelos (A) | $A_{(t)} = U \cdot q_{o_z(t)} \cdot P_{(t)}^{1.218}$ |
| Concentración de sedimentos (c_{sim}) | $c_{sim(t)} = 1E5 \cdot \frac{A_{(t)}}{Q_{sim(t)}}$ |

Fuente: Elaboración propia.

Para calcular los beneficios hidrológicos y económicos del proyecto específico y sus escenarios, el proceso se resume en la **Tabla 2**. Los detalles de estos cálculos se pueden consultar en el *Manual de Uso*⁴ de CUBHIC 2.0.

Tabla 2. Resumen de beneficios hidrológicos y económicos agregados a escala anual (asumiendo pasos de tiempo diario).

| | |
|---|---|
| Salidas acumuladas (V) para variables (varQ) hidrológicas | $V_{varQ} = \sum_1^n varQ_{sim(t)}$ |
| Carga de sedimentos acumulada (M_A) | $M_A = \text{área} \sum_1^n A_{(t)}$ |
| Concentración de sedimentos promedio (μ_c) | $\mu_c = \frac{\sum_1^n c_{sim(t)}}{n}$ |
| Número de días por encima (D_{ua}) o debajo (D_{ub}) de umbrales de variable (var) caudal o sedimentos | $D_{ua,var} = \sum_1^n i_{(t)} \quad \text{cuando } var_{sim(t)} > U_{var,alto}$ $D_{ub,var} = \sum_1^n i_{(t)} \quad \text{cuando } var_{sim(t)} < U_{var,bajo}$ |
| Volumen por encima (V_{ua}) o debajo (V_{ub}) de umbrales de variable (var) caudal o sedimentos | $V_{ua,var} = \sum_1^n (var_{sim(t)} - U_{var,alto}) \quad \text{cuando } var_{sim(t)} > U_{var,alto}$ $V_{ub,var} = \begin{cases} \sum_1^n var_{sim(t)} & \text{cuando } var_{sim(t)} < U_{var,bajo} \\ \sum_1^n U_{var,bajo} & \text{cuando } var_{sim(t)} \geq U_{var,bajo} \end{cases}$ |
| Cambio en una variable con respecto a la línea base (Δ_{var}) | $\Delta_{varEi} = (V_{var})_{Ei} - (V_{var})_{LB}$ |
| Costos de escenario (Ei) por cambios de cobertura (D_{cob}) | $D_{cobEi} = \sum_1^3 \max(0, ((\text{área}_{cobertura_j})_{Ei} - (\text{área}_{cobertura_j})_{LB}) \cdot \text{costo}_{cobertura_j})$ |
| Costos de escenario (E) por implementación de zanjas de infiltración (D_{int}) | $D_{intEi} = A_{z2} \cdot \text{costo}_{rem} + V_z \cdot \text{costo}_{exc}$ |
| Costo total de implementación (D_{total}) de escenario (E) | $D_{totalEi} = D_{cobEi} + D_{intEi} + D_{otrEi}$ |
| Costo-eficiencia en una variable (CE_{var}) | $CE_{varEi} = \frac{\Delta_{varEi}}{D_{totalEi}}$ |

Fuente: Elaboración propia.



Foto: Ana Castañeda

www.infraestructuranatural.pe

El proyecto Infraestructura Natural para la Seguridad Hídrica promueve la conservación, restauración y recuperación de los ecosistemas a nivel nacional, formando alianzas con organizaciones públicas y privadas para reducir los riesgos hídricos como sequías, inundaciones y contaminación del agua.

El proyecto es promovido y financiado por la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID) y el Gobierno de Canadá y ejecutado por Forest Trends, CONDESAN, la Sociedad Peruana de Derecho Ambiental (SPDA), EcoDecisión e investigadores del Imperial College London.

¿Cómo citar este documento?

Ochoa-Tocachi, B. F., Cuadros-Adriazola, J., & Bonnesoeur, V. (2022). CUBHIC 2.0: Metodología de cuantificación de impactos de protección de bosques y restauración forestal. Forest Trends, Lima, Perú.



Canada



Imperial College
London