

GUÍA METODOLÓGICA SIMULACIÓN DE LA GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS EN WEAP

Alex Manuel Aviles Añazco
Luciano Agustín Galán Montero
Mario Patricio Peña Ortega
Dario Xavier Zhiña Villa



GUÍA METODOLÓGICA

SIMULACIÓN DE LA GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS EN WEAP

Alex Manuel Avilés Añazco
Luciano Agustín Galán Montero
Mario Patricio Peña Ortega
Dario Xavier Zhiña Villa

Guía metodológica.

Simulación de la gestión de recursos hídricos en WEAP

©Universidad de Cuenca
Facultad de Ciencias Químicas
Carrera de Ingeniería Ambiental

Alex Manuel Avilés Añazco
Luciano Agustín Galán Montero
Mario Patricio Peña Ortega
Dario Xavier Zhiña Villa

Autores

María Augusta Hermida Palacios
Rectora de la Universidad de Cuenca

Centro Editorial UCuenca Press

Director: Daniel López Zamora. **Coordinadora Editorial:** Ángeles Martínez Donoso.
Diseñador: Geovanny Gavilanes Pando. **Corrección de estilo:** Alexandra Vázquez y
Verónica Andrade Aguilar.

Ciudadela Universitaria
Doce de Abril y Agustín Cueva
(+ 593 7) 405 1000
Casilla postal 01.01.168
www.ucuenca.edu.ec

Primera edición. Formato digital

Derecho de autor reservados

ISBN Digital: 978-9978-14-535-7

Para la composición tipográfica de este manuscrito se usó *Alegreya sans*.

El presente documento ha sido evaluado por dos pares externos bajo el sistema doble ciego.

Marzo, 2024

Cuenca - Ecuador

Esta guía fue un producto del proyecto “Adaptación a los impactos del cambio climático en los recursos hídricos en los Andes (AICCA), caso de estudio en la subcuenca del río Machángara” en el marco del convenio interinstitucional entre la Universidad de Cuenca, el Consorcio para el Desarrollo Sostenible De la Ecorregion Andina y la Empresa Electro Generadora del Austro Elecaastro S.A., bajo la supervisión del Ministerio de Ambiente, Agua y Transición Ecológica (MAATE).

Índice

1. Simulación de la gestión de recursos hídricos	11
1.1. Modelo WEAP	11
1.1.1. Enfoque WEAP	12
1.1.2. Método de Escurrimiento de Lluvia (método de la humedad del suelo)	13
1.1.3. Parámetros de uso del suelo	15
1.1.4. Simulación de embalses.....	16
1.1.5. Generación hidroeléctrica en WEAP	17
1.1.6. Prioridades para la asignación del agua	19
1.1.7. Complemento nodos	19
1.1.8. Entorno del modelo	22
2. Pasos para la construcción del modelo	24
2.1. Definición del proyecto	24
2.1.1. Objetivo del proyecto	24
2.1.2. Datos generales	24
2.2. Recolección de datos	28
2.3. Procesamiento de datos previo a la construcción del modelo	39
2.3.1. Delimitación de <i>catchments</i>	39
3. Construcción del modelo	49
3.1. Esquema	49
3.1.1. Crear una nueva área	49
3.1.2. Agregar la información cartográfica.....	50
3.1.3. Ingreso de nodos al esquema	51

3.1.4. Definición de prioridades	58
3.1.5. Unidades	60
3.2. Ingreso de datos	61
3.2.1. Sitios de demanda y cuencas	63
3.2.2. Clima	63
3.2.3. Uso del suelo	66
3.2.4. Uso del agua	67
3.2.5. Nivel de actividad anual	67
3.2.6. Variación diaria	68
3.2.7. Consumo	68
3.2.8. Recursos y suministro	69
3.3. Creación de escenarios para calibrar y validar el modelo	76
3.3.1. Parámetros de uso del suelo	77
3.4. Resultados	88
3.4.1. Resultados de calibración y validación	88
3.4.2. Resultados de las demandas	90
3.4.3. Resultados de la generación de energía hidroeléctrica	92
Referencias	94

Índice de tablas

Tabla 1. Parámetros del suelo manejados en WEAP.....	15
Tabla 2. Vistas del entorno WEAP	23
Tabla 3. Sitios de demanda del recurso hídrico.....	25
Tabla 4. Pasos de tiempo para la modelación I	28
Tabla 5. Aporte de información	29
Tabla 6. Información agua potable Tixán	29
Tabla 7. Información demandas para riego	30
Tabla 8. Información demandas industriales	31
Tabla 9. Información de la GHE	31
Tabla 10. Áreas por cobertura de uso de suelo	33
Tabla 11. Información meteorológica del INAMHI de estaciones dentro y fuera de la subcuenca del río Machángara	37
Tabla 12. Áreas aportantes por <i>catchment</i>	46
Tabla 13. Porcentaje de área por <i>catchment</i> (cobertura de suelo del 2001)	47
Tabla 14. Porcentaje de área por <i>catchment</i> (cobertura de suelo del 2010)	47
Tabla 15. Porcentaje de área por <i>catchment</i> (cobertura de suelo del 2015)	48
Tabla 16. Nodos para generar el esquema	56
Tabla 17. Definición de prioridades	59
Tabla 18. Información de uso del agua por demandas	67
Tabla 19. Datos de variables de operación de embalses	70
Tabla 20. Datos de variables de operación de embalses locales.....	72
Tabla 21. Coeficientes de cultivo Kc	78
Tabla 22. Valores de los parámetros de calibración por <i>catchment</i>	80
Tabla 23. Índices de eficiencia en R del desempeño de la calibración 1 para M2 y M3	85
Tabla 24. Índices de evaluación del desempeño	88
Tabla 25. Calificación del rendimiento de un modelo	89
Tabla 26. Índices de eficiencia en R del desempeño para M2 y M3 (2000-2018) para la modelación III	89

Índice de figuras

Figura 1. Esquema de los elementos hidrológicos	13
Figura 2. Zonas con diferentes restricciones operativas en embalses de GHE	17
Figura 3. Representación de las elevaciones para la generación de energía hidroeléctrica	18
Figura 4. Complemento nodos para la generación del esquema	20
Figura 5. Subcuenca del río Machángara	25
Figura 6. Escenarios de la modelación	27
Figura 7. Series de caudal turbinado en Saymirín y Saucay	32
Figura 8. Series de caudal ecológico de despacho desde las presas	32
Figura 9. Coberturas del suelo	34
Figura 10. Caudales de ingreso a las presas de Chanlud y El Labrados	36
Figura 11. Ubicación de las estaciones meteorológicas del INAMHI	38
Figura 12. Archivos shape	39
Figura 13. Unidades hidrológicas	45
Figura 14. Ventana para la creación de una área nueva	49
Figura 15. Ventana para fijar límites del área	50
Figura 16. Incorporación de información cartográfica	51
Figura 17. Creación del nodo río Machángara	52
Figura 18. Trazo de ríos Machángara-Chulco	53
Figura 19. Creación de los <i>catchments</i>	54
Figura 20. Esquema de la modelación hidrológica de la subcuenca del río Machángara en WEAP	58
Figura 21. Definición de unidades	60
Figura 22. Archivo .csv con datos diarios ingresados al modelo	61
Figura 23. Archivo .csv con datos anuales ingresados al modelo	62
Figura 24. Introducción de datos en sitios de demanda	63
Figura 25. Series de precipitación para las 8 microcuencas	64
Figura 26. Series de temperatura para las 8 microcuencas	65
Figura 27. Área por <i>catchments</i>	66
Figura 28. % de Área por cobertura de la M1	66
Figura 29. Nivel de actividad anual de las demandas industriales	68
Figura 30. Consumo de las demandas	68
Figura 31. Introducción de información en recursos y suministro	69
Figura 32. Información de la relación elevación-volumen de la Represa Chanlud	71

Figura 33. Información de la relación elevación-volumen de la presa El Labrado	72
Figura 34. Información de la relación elevación-volumen del tanque de presión Tuñi	73
Figura 35. Información de la relación elevación-volumen del tanque de presión Dutasay	74
Figura 36. Series de máximo efluente hidráulico de los embalses locales	75
Figura 37. Información de caudal en medidor en Chanlud	75
Figura 38. Información de caudal en medidor en Labrado	76
Figura 39. Creación del escenario para calibrar y validar el modelo	77
Figura 40. Delimitación del paso de tiempo para la calibración 1	80
Figura 41. Obtención de resultados de caudales	82
Figura 42. Hidrograma del flujo simulado vs observado de M2, calibración 1	83
Figura 43. Hidrograma del flujo simulado vs observado de M3, calibración 1	83
Figura 44. Exportar tabla de resultados	84
Figura 45. Archivo Excel de los resultados exportados desde WEAP	84
Figura 46. Guardar versiones	86
Figura 47. Delimitación del paso de tiempo para la validación 1	86
Figura 48. Cambio de información de caudal de cabecera para la validación 1	87
Figura 49. Hidrograma del flujo simulado vs observado de M2, validación 1	87
Figura 50. Hidrograma del flujo simulado vs observado de M3, validación 1	88
Figura 51. Hidrograma del flujo simulado vs observado de M2	90
Figura 52. Hidrograma del flujo simulado vs observado de M3	90
Figura 53. Obtención de resultados de demandas de agua	91
Figura 54. Demandas de agua	91
Figura 55. Obtención de resultados de la generación hidroeléctrica	92
Figura 56. Demandas de energía hidroeléctrica	93

1. Simulación de la gestión de recursos hídricos

La gestión de recursos hídricos es la base para la toma de decisiones en el cruce entre la oferta y demanda de agua. Una herramienta valiosa para la gestión de sistemas de recursos hídricos en cuencas hidrográficas es la simulación computacional.

La complejidad de la dinámica de los sistemas hídricos, exige la utilización de paquetes informáticos para modelar el comportamiento de la oferta y demanda de agua. Las salidas resultantes de este proceso de modelación sirven para la toma de decisiones, en distintos campos de estudio, tales como, el análisis y evaluación de acciones de gestión históricas y potenciales en un contexto de una asignación equitativa de agua, una prevención y mitigación de impactos por extremos hidroclimáticos y una adaptación a cambios en el clima, la demografía y en el uso y cobertura del suelo.

En este sentido, la presente guía tiene el objetivo de describir los pasos a seguir para una simulación de la gestión de recursos hídricos con el modelo WEAP. En donde está incluida una modelación hidrológica, la modelación de la operación de sistema de recursos hídricos y la simulación de escenarios futuros.

El documento tiene la finalidad de orientar a estudiantes y profesionales académicos en los campos de la ingeniería del agua y gestión de recursos hídricos.

1.1. Modelo WEAP

El modelo WEAP, cuyo acrónimo en inglés corresponde a Water Evaluation and Planning System, es el Sistema de Evaluación y Planificación del Agua. Este *software* fue desarrollado por el Instituto de Medio Ambiente de Estocolmo (SEI) y se enfoca en integrar la gestión de los recursos hídricos con el comportamiento hidrológico de la cuenca en estudio (Paul y Elango, 2018).

WEAP permite evaluar diversos escenarios, tanto climáticos como estratégicos (proyectos), al modelar los procesos propios de una cuenca, tales como la precipitación, la escorrentía, el comportamiento subterráneo

y los usos de suelo, entre otros (HyG Engineering, 2017). Además, aborda aspectos derivados de la demanda humana, como la generación hidroeléctrica, la creación de embalses, las necesidades para el consumo (plantas de tratamiento de agua potable - PTAP, sistemas de riego, demandas industriales, entre otras). Esto proporciona al usuario un conjunto sólido de herramientas para analizar el uso del agua y optimizar su gestión.

En función de los objetivos perseguidos con la modelación en WEAP, surgirá la necesidad de obtener información, tanto de datos climático-ecológicos, como de suministro y demanda. Para realizar una modelación detallada de una cuenca que abarque múltiples servicios hidrológicos, se requerirá un amplio rango de datos para su desarrollo.

1.1.1. Enfoque WEAP

WEAP funciona utilizando el principio del balance hídrico, en el cual el analista esquematiza en los nodos de influencia, denominados *catchments* o unidades hidrológicas, que representan las áreas de captación y fuentes de suministro del área de estudio, así como los puntos de demanda. Este sistema se alimenta con la información requerida para obtener datos confiables sobre la oferta y demanda de agua (SEI, 2009).

Una vez que se han definido los *catchments*, se introduce la información de suelo, que incluye la caracterización por áreas de la cobertura vegetal y los parámetros propios de cada tipo de cobertura. Además, se incorpora la información climática requerida para el modelo, que abarca datos como precipitación, temperatura, humedad, viento, latitud, fracción de nubosidad, punto de congelación, punto de fusión, datos de albedo y datos de nieve. Además, WEAP cuenta con herramientas adicionales para proyectos que consideran inundaciones, valoraciones económicas y/o modelación de glaciares.

Es importante complementar la delimitación de los *catchments* con nodos de medición de caudales que contengan las series observadas de caudal. Estas series permitirán al modelo comparar los flujos simulados.

WEAP incluye 5 métodos para la modelación hidrológica, enumerados a continuación:

1. Esguerrimiento de lluvia (método del coeficiente simplificado)
2. Solo demandas de riego (método del coeficiente simplificado)

3. Ecurrimiento de lluvia (balance hídrico entre dos baldes)
4. MABIA (Doble KC, diario, FAO 56)
5. Desarrollo de plantas (diario, CO₂, efectos de estrés por agua y temperatura)

1.1.2 Método de Ecurrimiento de Lluvia (método de la humedad del suelo)

Es el método más complejo, conocido como el método de los dos baldes, debido a que representa el balance hídrico entre dos capas de suelo, como se ilustra en la Figura 1. Cada balde se considera un subsistema dentro del esquema, debido a que cada uno tiene sus entradas y salidas definidas (HyG Engineering, 2017).

En la capa superior se simula la evapotranspiración (ET), considerando la caracterización del impacto del uso del suelo en los procesos de flujo del agua. Los parámetros de regulación del flujo subsuperficial incluyen la lluvia y el riego, la escorrentía, el flujo lateral superficial de agua y los cambios en el contenido de agua en el suelo. En la capa inferior, se simula el paso del flujo base, que representa tanto el aporte desde y hacia los acuíferos como los cambios en el contenido de agua del suelo (CCGUCC y SEI, 2009).

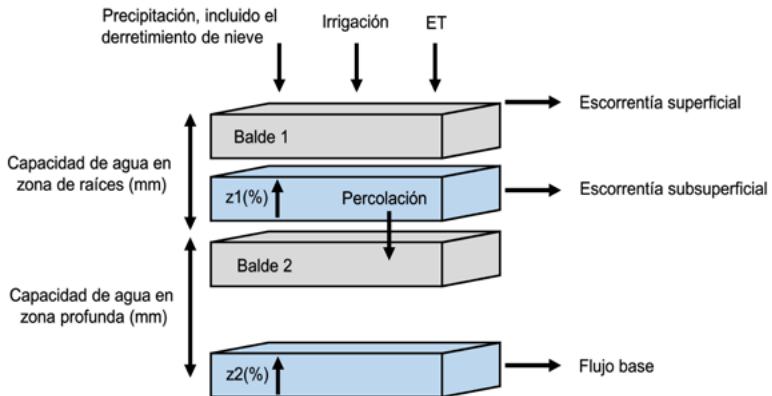


Figura 1. Esquema de los elementos hidrológicos.
Fuente: CCGUCC y SEI (2009).

El método de humedad del suelo se fundamenta en funciones empíricas que describen la evapotranspiración, la escorrentía superficial y subsuperficial, así como la percolación.

En el sistema de una cuenca hidrográfica, esta puede ser dividida en N *catchments* o subcuencas, que representan zonas con diversos usos y tipos de suelo. Se debe calcular un balance de agua para cada área j de N , introduciendo las series de clima correspondientes para cada subcuenca (CCGUCC y SEI, 2009). El balance hídrico para cada subcuenca se define de la siguiente manera:

$$Rd_j \frac{dz_{1,j}}{dt} = P_e(t) - PET(t)k_{c,j}(t) \left(\frac{5z_{1,j} - 2z_{1,j}^2}{3} \right) - P_o(t)z_{1,j}^2 - f_j k_s z_{1,j}^2 - (1 - f_j)k_s z_{1,j}^2$$

Cambio en humedad del suelo = Precipitación efectiva - Evapotranspiración - Escorrentía superficial - Flujo intermedio - Percolación

Ecuación 1. Balance hídrico del balde superior.

Nota: el término $P_e(t)$ de precipitación efectiva incluye el aporte del riego y del derretimiento de nieve.

Para calcular la evapotranspiración potencial, *PET* WEAP utiliza la ecuación de Penman-Monteith Modificada para un cultivo estándar de césped con una altura de 12 cm.

$$S_{max} \frac{dz_2}{dt} = \left(\sum_{j=1}^N (1 - f_j)k_{s,j} z_{1,j}^2 \right) - k_{s2} z_2^2$$

Cambio en humedad del suelo = Percolación - Flujo base

Ecuación 2. Balance hídrico del balde inferior.

El flujo de entrada a este "balde" es la percolación profunda del almacenamiento en la parte superior, como se indica en la ecuación 2.

1.1.3. Parámetros de uso del suelo

A continuación, se presentan los parámetros de uso del suelo manejados en WEAP; estos mismos deben ajustarse durante el proceso de calibración según la información específica de la zona de estudio.

Tabla 1. Parámetros del suelo manejados en WEAP

Parámetro	Descripción	Unidad/Rangos
[Sw] Capacidad de almacenamiento de agua en la zona de raíces	La capacidad efectiva de retención de agua de la capa superior del suelo, ("cubo" superior).	mm 0 y superior. Por defecto 1000mm
[Dw] Capacidad de almacenamiento de agua en la zona profunda	Capacidad de retención de agua efectiva en la capa más baja del suelo ("cubo" inferior). Esto se da como un valor único para la cuenca y no varía según el tipo de suelo.	mm 0 y superior. Por defecto 1000mm
[RRF] Factor de resistencia a la escorrentía	Controla la respuesta a la escorrentía superficial, por lo tanto, está relacionado con el índice de área foliar y la pendiente del terreno. La escorrentía tiende a disminuir con valores más altos, y puede variar entre los tipos de suelo.	Adimensional 0 a 10. Por defecto 2
[ks] Conductividad de zona de raíces	La tasa de conductividad de la zona de raíces ("cubo" superior) a plena saturación (cuando $z_1 = 1$). Se divide según la dirección preferencial del flujo entre el flujo subsuperficial y el flujo base. Puede variar entre los tipos de suelo.	mm/mes Por defecto 20 mm/mes

[kd] Conductividad de la zona profunda	Tasa de conductividad (longitud / tiempo) de la capa profunda ("cubo" inferior) a plena saturación (cuando $z2 = 1$). Controla la transmisión del flujo base y es proporcional a su generación. Se ingresa como un valor único para el <i>catchment</i> .	mm/mes 0.1 y superior. Por defecto 20 mm/mes
[f] Dirección preferencial de flujo	Valor de 1 = 100% flujo horizontal, 0 = 100% de flujo vertical. Se utiliza para dividir el flujo entre la capa de la zona de la raíz ("cubo" superior) y la capa inferior del suelo ("cubo" inferior). Puede variar entre los tipos de suelo.	Adimensional 0 a 1 Por defecto 0.15
[Z1 inicial] Nivel de humedad en la zona de raíces	Valor inicial de Z1 al comienzo de una simulación. Z1 es el almacenamiento relativo, dado como un porcentaje del almacenamiento efectivo total de la capacidad de agua de la zona radicular.	% 0 al 100% Por defecto 30
[Z2 inicial] Nivel de humedad en la zona profunda	Valor inicial de Z2 al comienzo de una simulación. Z2 es el almacenamiento relativo, dado como un porcentaje del almacenamiento efectivo total del cubo de suelo inferior (capacidad de agua profunda).	% 0 al 100% Por defecto 30

Fuente: Centro de Cambio Global-Universidad Católica de Chile (2009).

1.1.4. Simulación de embalses

WEAP permite la simulación de las zonas de infraestructura destinadas al almacenamiento de agua mediante la opción de embalses. Estos embalses sirven para regular el suministro del recurso aguas abajo y, en caso necesario, se utilizan para la generación hidroeléctrica.

Los embalses de regulación, comúnmente empleados en la modelación de presas, tienen la capacidad de modificar el curso del río. Con base en la información sobre los niveles de almacenamiento, los operadores ajustan el caudal de despacho para satisfacer los requerimientos del sistema. WEAP divide los embalses en cuatro zonas de operación.

Durante la simulación, el modelo garantiza que la zona de control de inundación siempre esté vacante y permita la liberación de agua hacia la zona inmediatamente inferior para cumplir con las demandas aguas abajo. Cuando el nivel de almacenamiento alcanza la zona de amortiguamiento, el despacho de agua está controlado por el coeficiente de amortiguamiento, que representa el porcentaje de agua disponible para la descarga una vez alcanzado este nivel.

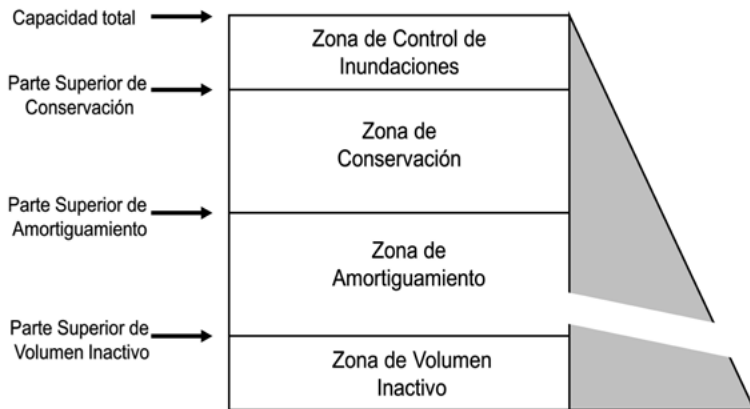


Figura 2. Zonas con diferentes restricciones operativas en embalses de GHE.
Fuente: SEI (2015).

1.1.5. Generación hidroeléctrica en WEAP

Existen tres métodos para definir la generación hidroeléctrica. El primero corresponde a centrales hidroeléctricas de paso, una opción de los complementos del esquema. Los dos siguientes parten de nodos de embalse. El método de generación individual de energía se aplica a cada reservorio, o se utiliza la energía agregada a nivel de sistema (SEI, 2015). Puede elegir cualquiera de los dos métodos de generación individual o incluso usar ambos simultáneamente. En caso necesario, se pueden establecer diferentes prioridades para la demanda del sistema y las demandas individuales.

1.1.5.1. Embalses de generación hidroeléctrica

La generación de energía hidroeléctrica se calcula a partir del flujo proveniente del reservorio que pasa a través de la turbina hasta alcanzar un valor máximo de diseño. En embalses con generación hidroeléctrica, el cálculo de la altura

de caída del agua en las turbinas se realiza mediante la siguiente ecuación 3, tomando como punto de referencia un mismo nivel (SEI, 2015), como se muestra en la Figura 3:

$$\begin{aligned} \text{Caída} &= \text{Elevación del reservorio al inicio del mes} \\ &\quad - \text{Elevación de la cola de agua} \end{aligned}$$

Ecuación 3. Cálculo de la altura de caída del agua en las turbinas.

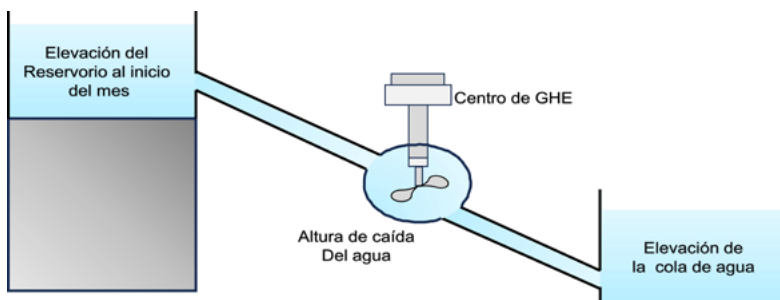


Figura 3. Representación de las elevaciones para la generación de energía hidroeléctrica.

Fuente: (Flores & Galán, 2019)

La energía hidroeléctrica solo se generará hasta el máximo caudal de turbina ingresado. La elevación de la cola de agua se utiliza para calcular la carga de agua que ha pasado a través de la turbina. La potencia generada en un periodo dado depende de la altura disponible, la cual se calcula como la caída desde la elevación del reservorio hasta la elevación de la cola de agua (valores considerados en la curva de elevación volumen y el volumen de almacenamiento al inicio de la modelación).

El factor de planta es el porcentaje de tiempo durante el cual la planta está en funcionamiento. La eficiencia en la generación de la planta corresponde a la eficacia del generador para convertir la energía potencial del agua en electricidad.

En WEAP se asume que los embalses destinados a la generación hidroeléctrica tienen una forma cilíndrica, en la cual se representan las zonas con diferentes

restricciones operativas, tal como se observa en la Figura 2. Las zonas de conservación y amortiguamiento contienen el volumen de agua disponible para la operación de las centrales, mientras que el agua de la zona inactiva no está disponible para la generación (SEI, 2015).

WEAP asegura que la zona de control de inundaciones permanezca disponible al descargar agua hacia la zona aprovechable.

1.1.6. Prioridades para la asignación del agua

WEAP determina el orden de asignación del agua mediante la definición de las prioridades de demanda y las preferencias de suministro. Las prioridades de demanda se establecen para definir el orden de cobertura entre las demandas, ya sean domésticas, ecológicas, agrícolas, de generación hidroeléctrica, industriales, entre otras. Es importante destacar que los valores de prioridad van de 1 a 99, donde 1 representa la prioridad más alta, es decir, la primera en ser abastecida (SEI, 2009). Además, el requerimiento de caudal en los embalses y tanques de presión de los reservorios de generación hidroeléctrica también deben contar con una prioridad de llenado. Es común establecer valores cercanos al 99 para el llenado de embalses, asegurando de esta manera el almacenamiento de agua solo si hay excedente después de satisfacer todas las demandas aguas abajo.

Las preferencias de suministro, por otra parte, deben ser definidas para los enlaces de conducción hacia las demandas. Al asignar un valor de 1 en este campo, se garantiza que la distribución del agua se base exclusivamente en las prioridades establecidas para la demanda.

1.1.7. Complemento nodos

El esquema es la representación gráfica de los componentes de la cuenca mediante el uso de diferentes nodos y componentes (SEI, 2009):

Ríos, desvíos y nodos fluviales	
	Río
	Derivación
	Embalse
	Agua Subterránea
	Sitio de Demanda
	Unidad Hidrológica
	Planta de Tratamiento de Aguas
	Escorrentía/Infiltración
	Conducción
	Flujo de Retorno
	Centrales Hidroeléctricas de P
	Requerimiento de Caudal
	Medidor de Caudal

Figura 4. Complemento nodos para la generación del esquema.

- **Nodo de río:** permite marcar la ruta de los ríos a medida que atraviesan la cuenca.
- **Nodos de derivación:** corresponden a sitios de desvío de agua entre ríos, representando estructuras creadas por el hombre, como canales o tuberías. Este nodo puede asumir las características de un río, al cual es posible incorporar otros nodos.
- ▲ **Nodos de embalse:** representan las zonas de embalse en un río, almacenando agua en su estructura. Esta agua puede utilizarse para satisfacer las demandas de consumo en el lugar en que están ubicadas, como la generación hidroeléctrica, o para su uso aguas abajo. Cuando se requiera ingresar la generación hidroeléctrica directamente en los embalses locales, es necesario indicar el valor del caudal máximo de turbina. Esto se debe a que, al dejar el valor predeterminado de cero, el modelo no asigna recursos para este propósito.

■ **Nodo de agua subterránea:** estos nodos pueden tener caudales de entrada naturales, como la infiltración desde los *catchments*, y también pueden alimentarse mediante sitios de demanda o retornos de plantas de tratamiento de aguas residuales.

● **Sitios de demanda:** definidos como conjuntos de usuarios del recurso hídrico que comparten el mismo sistema de distribución física. Pueden representar un grupo de usuarios al definirse como una demanda agregada, así como también pueden separarse los usos en sitios de demanda individuales.

● **Unidades hidrológicas o *catchments*:** representan las fuentes de suministro del recurso hídrico, comúnmente utilizados para definir zonas de cabecera. En estas zonas, el flujo de salida alimenta la unidad hidrológica y, en conjunto, la cuenca.

● **Plantas de tratamiento de aguas residuales:** representan las infraestructuras donde reciben agua de los sitios de demanda. Luego de un proceso de eliminación de contaminantes, devuelven el efluente tratado a uno o más componentes del sistema, ya sea a nodos de río u otros sitios de demanda.

-- **Enlaces de escorrentía/infiltración:** transportan la escorrentía e infiltración desde el centroide del *catchment* hacia los nodos de río, embalse o agua subterránea. La escorrentía e infiltración de los *catchments* corresponde a agua de precipitación, el derretimiento de nieve y al almacenamiento de la humedad del suelo que no se pierde por evapotranspiración u otras pérdidas relacionadas con la retención del suelo. La escorrentía de captación también se puede designar como el caudal de cabecera a un río. Para lograr esto, se coloca el enlace de escorrentía/infiltración en la cabeza del río. Los enlaces de escorrentía/infiltración también pueden vincular un nodo de agua subterránea, incorporando así al modelo el flujo subterráneo o los acuíferos de una cuenca.

— **Nodos de conducción:** representan los puntos donde se toma agua del río para dirigirla hacia un sitio de demanda.

— **Nodos de flujo de retorno:** representan los caudales de retorno procedentes de los sitios de demanda, los mismos que pueden ser devueltos hacia nodos de río, reservorio o desvío.

■ **Central hidroeléctrica de pasada:** define la ubicación dentro de la cuenca de las estaciones de energía hidroeléctrica, con la especificación de ser una central de pasada.

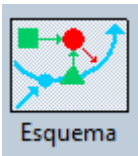

⊕ **Nodos de requerimiento de caudal:** definen el caudal mínimo en un punto del sistema, con la finalidad de cumplir con requisitos de caudal ecológico, como los parámetros de calidad del agua, requerimientos para la vida silvestre, entre otros. También se utilizan para cubrir necesidades de caudal mínimo para la navegación y/o procesos recreativos aguas abajo.


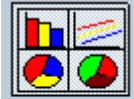

✦ **Medidores de caudal:** marcan los puntos en los que se han realizado mediciones reales del flujo. En estos componentes se ingresan las series observadas de caudal con el fin de compararlas con los caudales simulados.

1.1.8. Entorno del modelo

El entorno del modelo WEAP presenta diferentes vistas de pantalla, facilitando así la experiencia de modelación para los usuarios. En la siguiente tabla se describen las vistas del entorno del modelo:

Tabla 2. Vistas del entorno WEAP

Vista	Pestaña gráfica	Descripción
Esquema		Interfaz gráfica basada en SIG para apoyo visual. En esta vista se desarrolla la representación gráfica del modelo utilizando complementos de nodo.
Datos		Vista para introducir la información climática, de cobertura de suelo, datos propios de las demandas, entre otros. Permite la lectura de valores asumidos como constantes y de series temporales de información desde archivos CSV.

Resultados	 Resultados	<p>En esta opción, obtenemos los resultados de la simulación en una vista gráfica, con datos como mapas que integran el esquema y los valores de caudal por punto. Además, ofrece la opción de visualizar mensajes de advertencia o error generados durante la ejecución del modelo.</p>
Explorador de escenarios	 Explorador de Escenarios	<p>Permite la visualización gráfica de los resultados por escenario. Además, es la vista a la cual el modelo se redirige después de una calibración automática.</p>
Notas	 Notas	<p>Esta opción admite el ingreso de texto por cada rama generada. Permite al modelador tomar apuntes del proceso en cualquier componente de la modelación.</p>

2. Pasos para la construcción del modelo

2.1. Definición del proyecto

2.1.1. Objetivo del proyecto

Realizar el modelo hidrológico del complejo multipropósito de la subcuenca del río Machángara, considerando todos los componentes del sistema, para evaluar el manejo y la gestión actual y futura de los servicios multipropósito del recurso hídrico.

2.1.2. Datos generales

Ubicación del proyecto

La subcuenca del río Machángara se encuentra en el austro ecuatoriano y forma parte de la cuenca del Paute, en el sistema hidrográfico del Santiago. Con una extensión de aproximadamente 325 00 hectáreas, abarca las parroquias de Checa, Chiquintad, Sinincay, Sayausí, Octavio Cordero Palacios, Ricaurte, Sidcay, Jerusalén, Nazón, Turupamba, Cojitambo, Déleg, Javier Loyola y Solano, de las provincias de Azuay y Cañar (ETAPA EP, 2019).

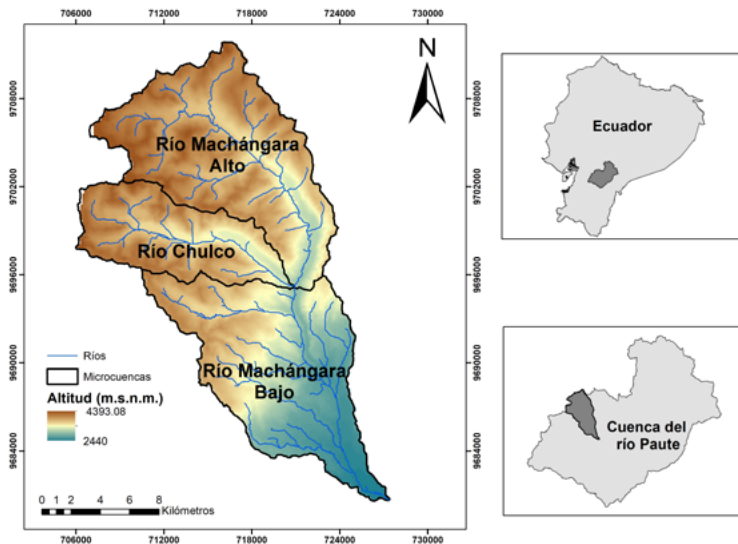


Figura 5. Subcuenca del río Machángara.

La Modelación Hidrológica de la subcuenca del río Machángara abarca toda su extensión, desde los puntos de recarga hídrica, ubicados en la parte alta. Estos puntos corresponden a las microcuencas de Chulco, con punto de aforo en la estación hidrometeorológica cercana a la presa de El Labrado, y la microcuenca de Machángara Alto, con aforo en la estación hidrometeorológica cercana de la presa de Chanlud. La zona media y baja de la subcuenca se divide en diferentes unidades hidrológicas, de acuerdo a los ríos y áreas que contribuyen al cauce principal del río Machángara. Además, se ubican los sitios de demanda del recurso hídrico.

Delimitación de los componentes del Sistema Hídrico sujetos a modelar

En el Complejo Machángara se encuentran importantes obras de infraestructura debido a los servicios multipropósito del recurso hídrico. Los servicios a evaluar incluyen el abastecimiento de agua para el consumo humano, generación hidroeléctrica, contribución a sistemas de riego y procesos industriales, además de los requerimientos ecológicos propios del Río.

Tabla 3. Sitios de demanda del recurso hídrico

Sistema	Sitio de demanda	Funciones
Embalses	El Labrado	Regulación de caudales. Aprovechamiento para alimentar los demás sistemas. Reservas para épocas de estiaje.
	Chanlud	
Plantas de potabilización de agua	PTAP Tixán	Abastecimiento de agua potable aproximadamente al 60% de la población cuencana.
	PTAP Patamarca	
	PTAP Chulco-Soroche	Abastecimiento de agua de parroquias rurales del noreste del cantón Cuenca.
Canales de riego	Sistema de Riego Checa-Sidcay-Ricaurte	Abastecer a las comunidades de Ricaurte, Checa y Sidcay.
	Sistema de Riego y Drenaje Machángara	Abastecer a la comunidad de Chiquintad.
	Sistema de Riego y Drenaje Sociedad de Riego Ricaurte	Abastecer a las comunidades de Ricaurte – La Dolorosa.
Procesos industriales	EMURPLAG EP	Realizar procesos de limpieza e incorporación en el desarrollo del proceso productivo.
	GRAIMAN	
	CARTOPEL	
	Continental Tires	
	Hormicroto Cía. Ltda.	

Reservorios para la generación hidroeléctrica	Tuñi	Alimentar a la central de generación hidroeléctrica Saucay.
	Dutasay	Alimentar a la central de generación hidroeléctrica Saymirín.
Centrales de generación hidroeléctrica	Saucay	Generar una potencia instalada sumada de 38.4 MW, la misma que es entregada al Sistema Nacional Interconectado.
	Saymirín	

Fuente: Consejo de Cuenca del río Machángara (2015)

Definición de los períodos de modelación

Corresponde a los escenarios que se simularán en la modelación, los cuales se definen según el periodo que abarcan los datos climáticos, hidrológicos, de cambio de uso de suelo y demás información que alimentará el modelo.

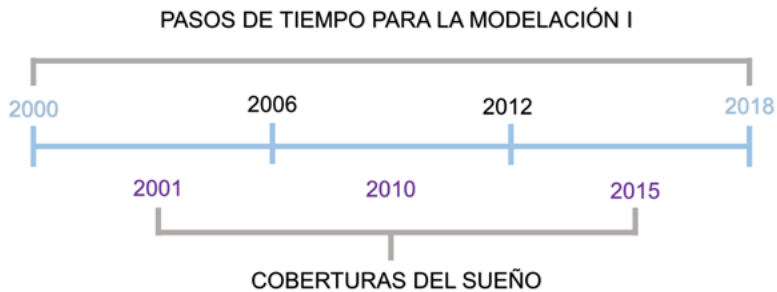


Figura 6. Escenarios de la modelación I.

- El periodo histórico de modelación cubre una duración desde el primero de enero de 2000 hasta el 31 de diciembre de 2018.
- Se ingresa la información cartográfica de coberturas del suelo levantada en la zona para los años 2001, 2010, 2015.
- Debido al cambio en la cobertura del suelo, es necesario dividir la modelación en diferentes escenarios, tal como se observa en la siguiente tabla:

Tabla 4. Pasos de tiempo para la modelación I

Cobertura de suelo	Cuentas corrientes¹	Calibración	Cuentas corrientes	Validación
2001	2000	2001 - 2005	2005	2006
2010	2006	2007 - 2011	2011	2012
2015	2012	2013 - 2017	2017	2018

Paso de tiempo de la simulación

De acuerdo a los objetivos establecidos para el desarrollo del proyecto, se determinó que una simulación del comportamiento hidrológico a escala diaria permitirá la evaluación precisa del riesgo climático en el sector hídrico. Por lo tanto, la información requerida debe presentar un registro diario y cubrir un periodo de 19 años que van desde el primero de enero de 2000 hasta el último día de 2018.

2.2. Recolección de datos

La obtención de la información necesaria para alimentar el modelo hidrológico en WEAP requiere la cooperación de las entidades concesionadas y a cargo de brindar el servicio respectivo. Estas entidades son:

1. INAMHI
2. ELECAUSTRO S.A.
3. Junta de Riego y Drenaje Machángara
4. Junta General del Sistema de Riego Checa-Sidcay-Ricaurte
5. Sociedad de Riego Ricaurte
6. ETAPA EP
7. Sistema de Agua Potable de Patamarca

¹ **Cuentas corrientes.** En WEAP, corresponde al periodo de calentamiento el cual cubre 1 año completo. Es considerado un escenario más, del cual se derivan los demás escenarios que comenzarán desde el siguiente año.

Tabla 5. Aporte de información

Datos	Institución						
	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.
Caudales de aporte	X	X				X	
Operación de embalses		X					
Generación hidroeléctrica		X					
Requerimiento de caudal		X	X	X	X	X	X
Valores referentes al consumo		X	X	X	X	X	X

Datos de sitios de demanda

Agua potable

- **PTAP Tixán:**

La planta de Tixán se abastece mediante el canal de riego Machángara, con un requerimiento de caudal histórico de 840 l/s, obtenidos de la toma 10 del canal. Debido a la ampliación de la planta, se prevé que el requerimiento de caudal futuro incremente a 1940 l/s.

Tabla 6. Información agua potable Tixán

Capacidad inicial del MÓDULO I (histórico)	840	l/s
Capacidad ampliada, con el MÓDULO II (futuro)	1100	
CAPACIDAD TOTAL DE TRATAMIENTO	1940	
Horizonte de servicio	HASTA 2045	

- **PTAP Patamarca:**

El Sistema de Agua Potable Patamarca se abastece a través del canal de riego Machángara, con un requerimiento de caudal acumulado de 70 l/s, obtenidos de las tomas 8 y 9 del canal.

- **PTAP Chulco-Soroche**

La planta de tratamiento de agua potable Chulco-Soroche está ubicada antes de la junta del río Chulco con el río Machángara. Su afluente principal es el río Chulco, y cuenta con una capacidad máxima de producción de 55 l/s.

- **Agua para riego**

El canal de riego Machángara toma el agua turbinada a la salida de la Central Saymirín, en las coordenadas X 721598, Y 960245.2. Este canal tiene una capacidad histórica de 1600 l/s, distribuidos entre diversas concesiones, siendo 840 l/s para la PTAP de Tixán y 70 l/s para Patamarca. Debido al incremento de la capacidad de tratamiento en Tixán, la capacidad futura del canal incrementa a 2700 l/s. En las coordenadas mencionadas, justo en frente de la toma para el canal de riego Machángara en Saymirín, en la margen izquierda del río, se encuentra la toma del canal de riego Checa-Sidcay-Ricaurte, con una concesión de caudal de 700 l/s. Aguas abajo de la central, en el punto con coordenadas X 723531.4992, Y9677102.5976, se encuentra la toma que abastece el canal de riego Sociedad Ricaurte, con un caudal concesionado de 192 l/s.

Tabla 7. Información demandas para riego

Parroquias	Nombre del sistema de riego	Caudal concesionado (l/s)	Área (ha)	Socios
Checa, Sidcay, Ricaurte	Sistema de Riego y Drenaje Checa-Sidcay-Ricaurte	700	730	836
Chiquintad, Sinincay, Hermano Miguel	Sistema de Riego y Drenaje Machángara	690	394.89	2157
Ricaurte	Sistema de Riego y Drenaje Sociedad de Riego Ricaurte	192	50	450

- **Agua para uso industrial**

Las industrias con concesiones de caudal tomadas del río Machángara utilizan el recurso en operaciones de limpieza y/o demás procesos relacionados con su actividad. A continuación, se detallan los valores de caudal por empresa en la siguiente tabla:

Tabla 8. Información demandas industriales

Industria	Caudal Concesionado l/s
EMURPLAG EP	0.463
GRAIMAN	9.167
CARTOPEL	44.444
Continental Tires	5.382
Hormicroto Cía. Ltda	0.405

- **Caudal turbinado para la GHE**

Las series de caudales turbinados son obtenidas a través de mediciones realizadas en ambas centrales manejadas por ElecAustro. Estos datos sirven para alimentar el modelo, junto con otra información relevante proveniente de las centrales de Sauca y Saymirín, así como de sus respectivos tanques de presión.

Tabla 9. Información de la GHE

	Unidad	Central Sauca	Central Saymirín
Potencia instalada	MW	24	14.4
Caudal en turbina	m³/s	6.76	8.386
Caída neta	m	212	425
Unidades de generación		4	4
Eficiencia del generador	%	97	97
Tanque de presión		Tuñi	Dutasay
Capacidad del tanque	m³	231 77.11	251 06.24
Altura del tanque	m	4.44	4.87

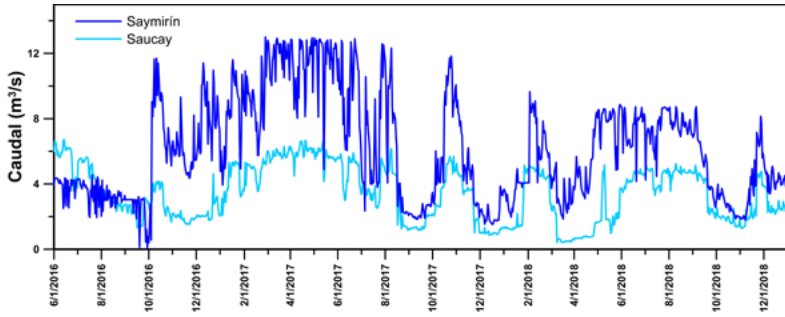


Figura 7. Series de caudal turbinado en Saymirín y Saucay

- **Requerimiento ecológico de caudal**

El requerimiento ecológico de caudal, según la definición del nodo de WEAP, es esencial para satisfacer las demandas ecológicas de flujo. Esto incluye cumplir con los requisitos de caudal ecológico, como parámetros de calidad del agua y necesidades para la vida silvestre, entre otros. Además, se utiliza para cubrir las necesidades de caudal mínimo para la navegación y/o procesos recreativos aguas abajo.

En el complejo Machángara, los puntos de monitoreo de caudal ecológico están ubicados a la salida de las presas de Chanlud y El Labrado, con valores mínimos requeridos de 90 l/s y 45 l/s respectivamente, formando parte del caudal despachado. Otro punto crucial donde se debe cumplir con un requerimiento de caudal es en la salida de la central Saymirín, con un valor mínimo de caudal constante de 235 l/s.

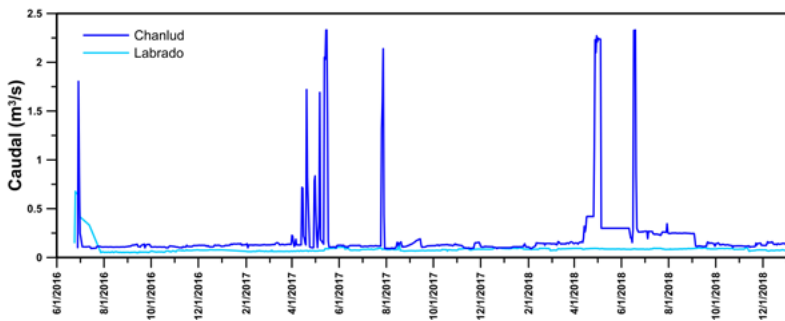


Figura 8. Series de caudal ecológico de despacho desde las presas.

- **Uso de suelo**

En la información de coberturas y uso del suelo de la subcuenca del río Machángara, propiedad del IERSE de la Universidad del Azuay, se obtienen los datos cartográficos, específicamente de la tabla de atributos de los *shapes* levantados en la zona para los años 2001, 2010 y 2015. Dado el análisis requerido en la modelación, es necesario introducir escenarios de uso de suelo y se usan estos datos debido a que están dentro del paso de tiempo definido para la modelación hidrológica y de gestión del recurso hídrico.

En la siguiente tabla, se observan los valores de área por coberturas de suelo levantados para la subcuenca:

Tabla 10. Áreas por cobertura de uso de suelo

Cobertura del suelo	2001		2010		2015	
	Extensión	% Área	Extensión	% Área	Extensión	% Área
Bosque	2940.70	9.06	3069.58	9.46	2299.28	7.09
Cuerpos de agua	268.91	0.83	265.67	0.82	269.38	0.83
Erial	677.36	2.09	557.70	1.72	456.31	1.41
Páramo	20552.09	63.34	20471.22	63.09	20519.11	63.24
Tierras agropecuarias	5107.45	15.74	5209.77	16.06	6067.23	18.70
Vegetación arbustiva y herbácea	2667.50	8.22	2446.69	7.54	2465.01	7.60
Zona antrópica	232.62	0.72	426.14	1.31	370.29	1.14
ÁREA TOTAL MACHÁNGARA	32446.62	100	32446.62	100	32446.62	100

Fuente: Información cartográfica UDA.

- **Análisis del cambio de cobertura y uso del suelo en la subcuenca del río Machángara**

Es importante realizar un análisis de los cambios en la cobertura y uso del suelo en la subcuenca del río Machángara mediante información cartográfica levantada en la zona para los años 2001, 2010, 2015.

En la siguiente Figura se observa la cobertura del suelo en los años mencionados con sus respectivas categorías. La subcuenca alto andina, con altitudes por encima de los 34 00 m.s.n.m., destacándose el páramo con pajonales y bosques dispersos de Quinua (*Polylepis spp*). También se identifica la presencia de cuerpos de agua, incluyendo lagunas naturales y los embalses de Chanlud y El Labrado (ACOTECNIC & Consejo de Cuenca río Machángara, 2015). Según la información cartográfica, no se evidencian cambios importantes en estas coberturas. Esto se debe a que la zona alta y parte del centro de la subcuenca están dentro del Área de Bosque y Vegetación Protectora del Machángara, abarcando aproximadamente un 67% del área total. Estas áreas representan zonas de alta conservación caracterizadas como ecosistemas frágiles y de vital importancia por los "servicios ecosistémicos", según el Acuerdo Ministerial N° 0292 del 22 de agosto de 1985 (Consejo de Cuenca del río Machángara, 2015).

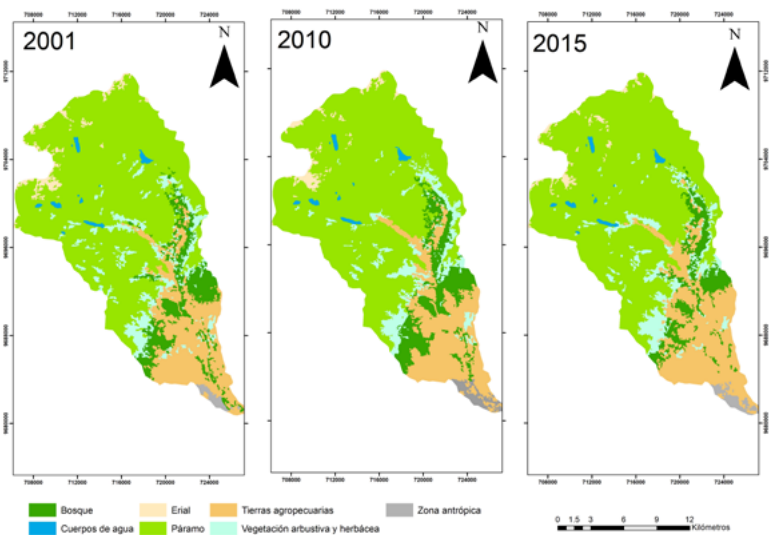


Figura 9. Coberturas del suelo.

Por debajo de los 3 400 m.s.n.m., se presenta el bosque alto montano, el cual, debido a la acción humana, ha sido transformado en áreas de pastizales. En áreas con altas pendientes, predomina la vegetación arbustiva y herbácea, la cual ha disminuido su área debido a la expansión de la frontera agrícola en la subcuenca.

Bajo los 3 000 m.s.n.m., en la parte baja de la subcuenca, la vegetación nativa ha sido destruida y reemplazada por zonas destinadas a la agroproducción y áreas de asentamientos humanos. Este cambio se incrementa con el paso del tiempo, como se puede observar en la Figura 9 y en Tabla 10.

- **Coficiente de cultivo**

El coeficiente de cultivo se considera como un valor constante para cada tipo de suelo durante la simulación, aunque pueden ingresar como parámetros variables a lo largo del año. Algunas coberturas corresponden a valores de referencia obtenidos de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). Por ejemplo, el Kc de bosques se toma del valor definido para las coníferas. El valor de 1.25 se asigna a cuerpos de agua con profundidad de más de 5 metros. Para la cobertura erial, el valor de Kc se toma del parámetro para suelo descubierto y seco. Dado que no hay un valor determinado para la tierra de cultivo para cada cuenca, se asigna un valor promedio del Kc de los cultivos abundantes en la zona, como vegetales pequeños, raíces y tubérculos, legumbres, papas, maíz grano y maíz dulce (FAO56, 2006).

Los valores de Kc para zonas antrópicas se obtienen del Tutorial WEAP para la cuenca del Estrella, tomando referencia de la cobertura urbanizada. Así mismo, el Kc para vegetación arbustiva y herbácea se extrae de la cobertura con el mismo nombre (Angarita & Mehta, 2016).

Por último, el coeficiente de cultivo del páramo se obtiene del estudio "La respiración de las tierras altas andinas: intercambio neto de ecosistemas y evapotranspiración sobre el páramo del sur de Ecuador" (Carrillo-Rojas et al., 2019).

- **Datos hidrometeorológicos**

Información preliminar

La información hidrometeorológica requerida debe presentar un registro diario y cubrir un periodo de 19 años, desde el primero de enero de 2000 hasta el último día de 2018.

La empresa Electro Generadora del Austro ElecAustro S.A. proporciona la información hidrometeorológica utilizada en el modelo.

En la siguiente Figura se presenta el hidrograma que ilustra los caudales de ingreso a las presas de Chanlud y El Labrado. Estos caudales se originan en los afluentes de la subcuenca.

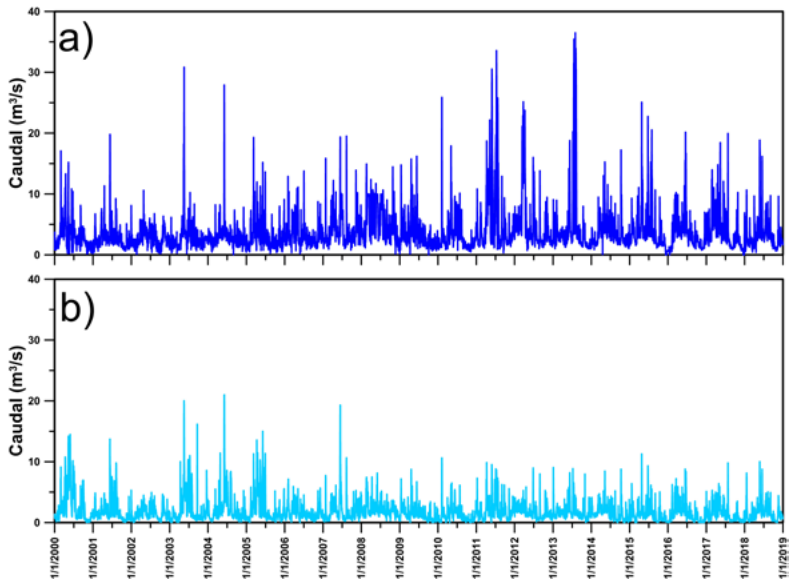


Figura 10. Caudales de ingreso a las presas de a) Chanlud y b) El Labrado.

Los datos de pluviosidad en las estaciones de Chanlud y El Labrado se obtienen de las mediciones realizadas en las estaciones meteorológicas administradas por ETAPA. La información sobre temperatura, tanto del bulbo seco y húmedo, entregadas por ElecAustro, corresponden a datos medidos por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología, INAMHI.

Tabla 11. Información meteorológica del INAMHI de estaciones dentro y fuera de la subcuenca del río Machángara.

NOMBRE ESTACIÓN	PRECIPITACIÓN			TEMPERATURA		
	Inicio	Fin	% Vacíos	Inicio	Fin	% Vacíos
El Labrado	01/01/1964	31/12/2014	3.67	01/01/1982	31/12/2014	3.67
Chanlud	01/01/2000	31/12/2015	5.29	01/01/2000	31/12/2015	5.29
Biblián	01/01/1976	31/12/2015	20.84	01/01/1982	30/06/2015	28.22
Ucubamba	01/04/1969	30/05/2005	12.70	01/01/1982	28/02/2005	31.33
Piscícola Chirimichay	01/01/1976	27/02/2015	10.34	01/01/1981	31/12/2015	0.00
Ricaurte Cuenca	01/01/1964	31/12/2015	3.34			
Sayausí Matadero dj	01/09/1967	31/08/2015	4.26	01/01/1981	31/12/2015	0.00
Surucucho Llulluchis	01/01/1964	31/12/2015	17.15	01/01/1981	31/12/2015	0.00

La base de datos diarios de precipitación y temperatura del INAMHI presenta un registro histórico extenso para las estaciones tanto dentro como fuera de la subcuenca del río Machángara. Por esta razón, se ha tomado en cuenta esta información para el relleno de datos faltantes y, posteriormente, la obtención de las series interpoladas de precipitación y temperatura mediante la distancia inversa ponderada (IDW).

- **Selección de las estaciones meteorológicas**

Las estaciones seleccionadas para el desarrollo de este proyecto cumplen con las siguientes consideraciones:

- Provenir de fuentes confiables.
- Provenir de un mismo ente administrador.
- No presentar incongruencias en las series.

- Cubrir largos períodos históricos.
- Las estaciones meteorológicas deben estar localizadas dentro de la subcuenca y en zonas cercanas a la misma.
- Presentar bajos porcentajes de vacíos en sus series.

Como se muestra en la Figura 11, estas estaciones están distribuidas en la subcuenca de estudio y sus alrededores.

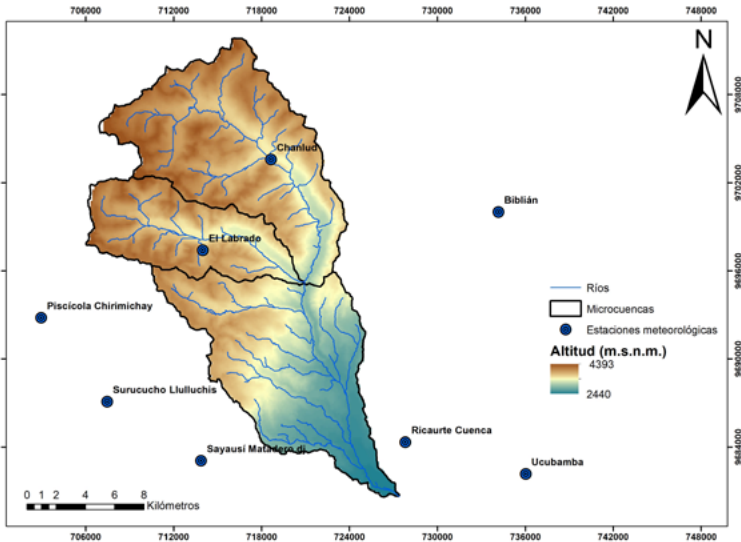


Figura 11. Ubicación de las estaciones meteorológicas de INAMHI.

- **Archivos tipo *shape***

La información cartográfica requerida se detalla a continuación y está también ilustrada en el gráfico siguiente:

- Contorno de la subcuenca (subcuenca_machngara.shp)
- Ríos (rio_CGS.shp)
- Delimitación de las unidades hidrológicas (machngara_microCGS.shp)
- Puntos centroides de las microcuencas (8centros_CGS.shp)
- Puntos de ubicación de las estaciones hidrometeorológicas (Estaciones

Ch_Lb.shp)

- Puntos de ubicación de importantes componentes del Complejo Machángara (puntos_importantes.shp)

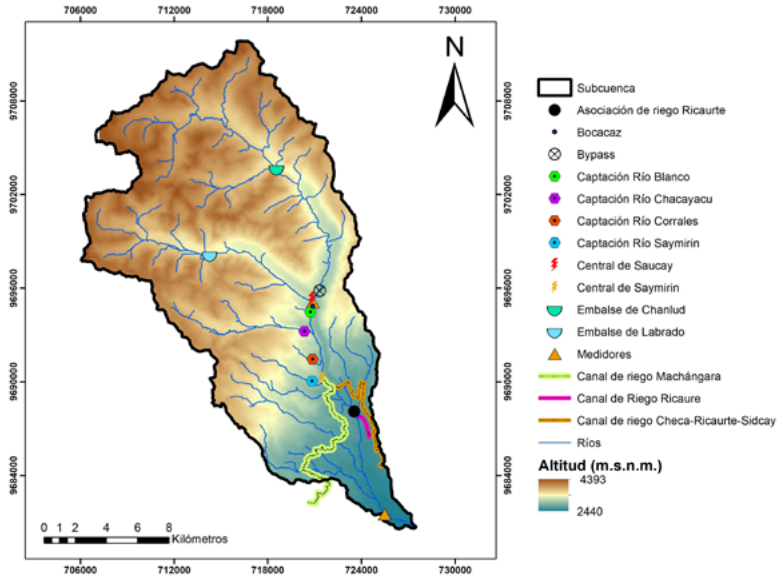


Figura 12. Archivos shape.

2.3. Procesamiento de datos previo a la construcción del modelo

En esta sección, se ofrecen indicaciones útiles sobre el tratamiento de datos y el uso de herramientas necesarias para procesar la información requerida por el modelo.

2.3.1. Delimitación de *catchments*

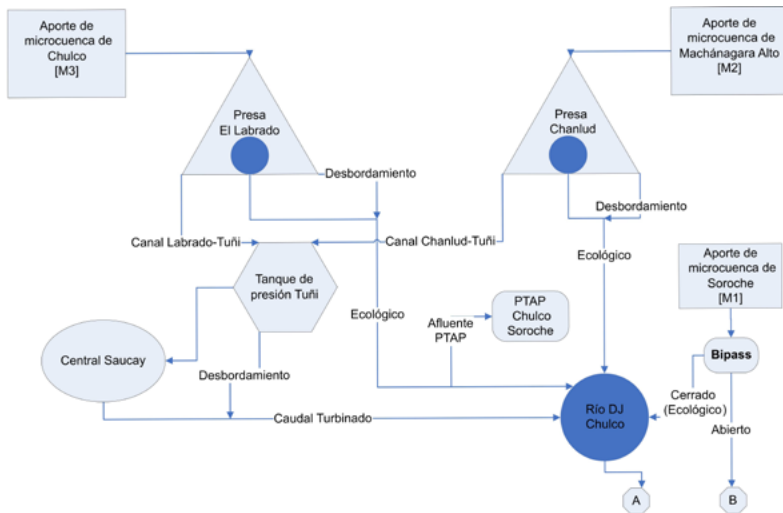
WEAP al ser un modelo semi distribuido, calcula el balance hídrico total, como la suma de los aportes en las áreas subyacentes. Esto implica la capacidad de dividir una cuenca en varias unidades hidrológicas o *catchments*. Estas unidades cuentan con información climática, como precipitación, temperatura, humedad, viento, etc., y se subdividen en su área debido a la información de cobertura de suelo. Los *catchments*, como se mencionó

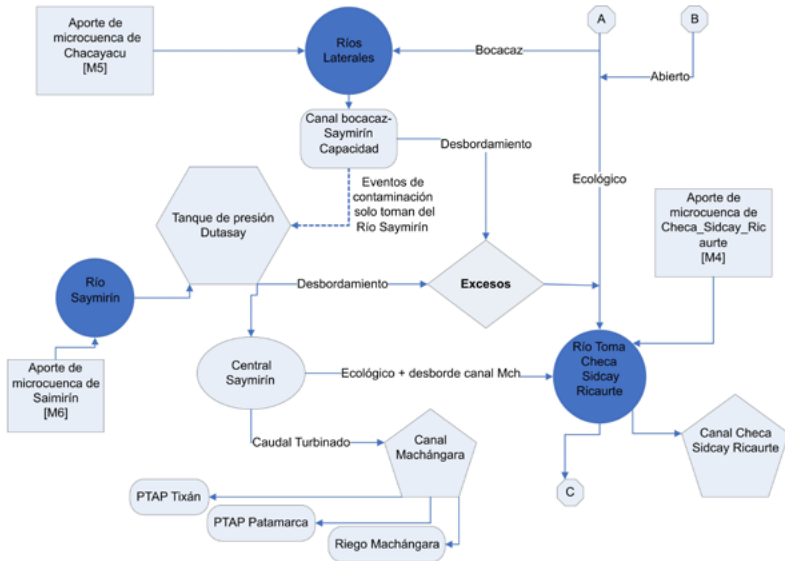
anteriormente, definen las unidades hidrológicas, sobre las cuales el modelo WEAP aplica rutinas según el método escogido. Esto permite estimar evapotranspiración, infiltración, flujo superficial y base. Además, representan las zonas donde ocurren los procesos hidrológicos en las diferentes coberturas del suelo.

La delimitación de *catchments* se realiza de acuerdo a la distribución de la red hídrica en la subcuenca del río Machángara y los lugares donde se tiene mediciones de caudal. Otra opción es identificar puntos importantes en donde se requieren las estimaciones.

Es importante cerrar las microcuencas en puntos de aforo, donde sea posible realizar comparaciones entre caudales simulados y observados. Esto se hace con el propósito de evaluar el desempeño del modelo, ya sea en la calibración, validación u otros escenarios.

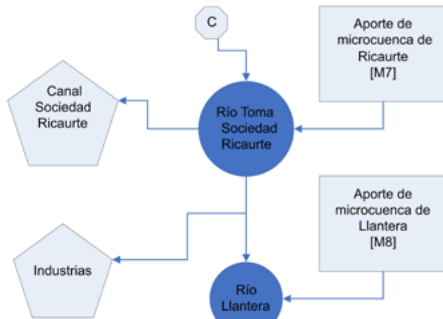
• **Flujograma del Complejo de Machángara**





Simbología

- Demandas
- Unidades Hidrológicas
- Estructuras
- Centrales Hidroeléctricas
- Presas
- Áreas aportantes
- Tanques de Presión
- Conectores



Análisis detallado del Complejo Machángara para la delimitación de *catchments*

En el flujograma se observa la distribución de las estructuras que componen el Complejo Machángara. Desde la zona de recarga hídrica en la parte alta, donde se encuentran las presas de regulación de Chanlud y El Labrado con

una capacidad de almacenamiento de aproximadamente 16.25 hm³ y 6.25 hm³, respectivamente. Cerca de estas estructuras Etapa y ElecAustro en conjunto, tienen estaciones de monitoreo hidrometeorológico, cumpliendo así con el requisito de puntos de aforo. En estos lugares, es posible cerrar los *catchments* y comparar los caudales simulados con las series observadas. Los aportes de las microcuencas respectivas están relacionados con los procesos de infiltración/escorrentía propios de las áreas en ambas unidades hidrológicas.

Los caudales despachados de las presas corresponden, por un lado, al requerimiento de caudal ecológico derivado al cauce de los ríos Machángara desde Chanlud y al río Chulco desde El Labrado. Otra salida de agua corresponde a los caudales vertidos por desbordamiento en épocas de invierno, donde eventos que superan la capacidad de almacenamiento en las presas, son posibles. Finalmente, la conducción de agua desde las presas hacia el tanque de presión Tuñi, alimenta la central hidroeléctrica de Saucay.

El canal Labrado-Tuñi, con una capacidad de hasta 2.4 m³/s, ingresa por el lado oeste del reservorio Tuñi. Construido de hormigón y de tipo abierto, aprovecha el aporte de las quebradas laterales. En cambio, el canal Chanlud-Tuñi, con una capacidad de 4.8 m³/s desemboca en la zona este del reservorio Tuñi y es una estructura cerrada en la mayor parte de su trayectoria.

El tanque o reservorio de presión Tuñi tiene una capacidad aproximada de 231 77 m³ y sirve para la regulación horaria de agua necesaria para la generación hidroeléctrica en la central Saucay ubicada a 425 metros por debajo del reservorio. El caudal turbinado en la central se devuelve al río Machángara en la confluencia del río Chulco. En este punto, se ubica la estación hidrometeorológica Machángara D.J. Chulco (Saucay), permitiendo el cierre de este *catchment* y la comparación de caudales en la modelación. El aporte de la microcuenca Soroche se debe al escurrimiento e infiltración del suelo, según el tipo de cobertura en esta zona.

A la salida de la unidad hidrológica en el punto río Machángara en Chulco D.J., se observa que el caudal es desviado hacia dos destinos. El primero es la conducción hacia el bocacaz, un canal con una capacidad de hasta 8.4 m³/s que desvía agua hacia el reservorio de Dutasay. Al ser un canal abierto, permite el aprovechamiento de los aportes laterales de los ríos Chacayacu, Corrales y Blanco. El segundo desvío del caudal se debe al requerimiento ecológico que se deja en el río Machángara.

El reservorio de Dutasay tiene una capacidad de almacenamiento de aproximadamente 25,106 m³. Se alimenta por el caudal proveniente del bocacaz y del río Saymirín. Este reservorio de regulación permite la generación hidroeléctrica en la central Saymirín, con una caída de agua de aproximadamente 212 metros. El agua turbinada de la central es conducida al canal Machángara luego de cumplir con un requisito mínimo de 0.235 m³/s de caudal ecológico derivado al río Machángara.

El canal Machángara administrado por la Junta de Riego y Drenaje Machángara, tiene una capacidad histórica de 1.6 m³/s, de los cuales 0.84 m³/s corresponden a la concesión para la PTAP de Tixán y 0.07 m³/s para la planta de Patamarca. Debido al incremento de la capacidad de tratamiento en Tixán, se proyecta un aumento futuro de la capacidad del canal a 2.7 m³/s. En frente de la toma para el canal de riego Machángara en Saymirín, en la margen izquierda del río, se encuentra la toma del canal de riego Checa-Sidcay-Ricaurte, con una concesión de caudal de 0.7 m³/s.

La unidad hidrológica del río Saymirín y el aporte de los ríos en la zona de riego del sistema Checa-Sidcay-Ricaurte son puntos importantes donde se requieren estimaciones debido a la falta de información y monitoreo.

Aguas abajo de la toma de agua para el sistema de riego Checa-Sidcay-Ricaurte, en el río Machángara, se ubica la toma para riego del sistema Sociedad de Riego Ricaurte, la cual cuenta con un caudal concesionado de 0.192 m³/s. Al igual que los puntos anteriores, esta se vuelve un área importante para estimaciones, debido a la falta de información y monitoreo.

Finalmente, en la parte baja de la subcuenca, después de cubrir las demandas industriales, se ubica la estación limnimétrica de medición de caudales al cierre de la subcuenca en el punto del río frente a la Llantera. Por lo tanto, cumple con el requisito de punto de aforo, donde es posible cerrar los caudales simulados y compararlos con las series observadas. Los aportes del área de la microcuenca están relacionados con los procesos de infiltración/escorrentía, como se mencionó anteriormente.

Nota: no se considera para la modelación hidrológica el canal de desvío Bypass, ubicado en el río Machángara antes de su junta con el río Chulco, en la desembocadura del río Soroche, debido a la falta de información del caudal derivado. Sin embargo, se tuvo en cuenta para el Modelo de Estimación de la Operación del Complejo Hidroeléctrico Machángara (MEOCHM).

Esta estructura de derivación tiene la función de desviar el cauce del río para evitar la contaminación del agua que ingresa al bocacaz, como se observa en el siguiente flujograma. Los problemas de contaminación se deben a eventos de deslizamientos que ocasionan la incorporación de material al curso del río en la microcuenca del Soroché. Esto conlleva problemas de incremento de turbidez y sólidos suspendidos, los cuales perjudican la operación en las centrales de generación hidroeléctrica y las plantas de tratamiento de agua potable, ubicadas aguas abajo.

Delimitación espacial de *catchments*

En el caso de la subcuenca del Machángara, se definen las unidades hidrológicas de acuerdo a los puntos de interés obtenidos del flujograma. Utilizando un *software* de procesamiento geoespacial, es necesario cerrar una o varias microcuencas que dividen el área de estudio. Se debe considerar la información del Modelo Digital del Terreno (MDT) para realizar la división de la subcuenca basada en las curvas de elevación y la red fluvial. El objetivo es conseguir áreas correspondientes a un sistema hídrico que drenan en un punto específico.

En la Figura 13 se muestra la división en microcuencas, las cuales funcionarán como *catchments* para la modelación hidrológica en WEAP:

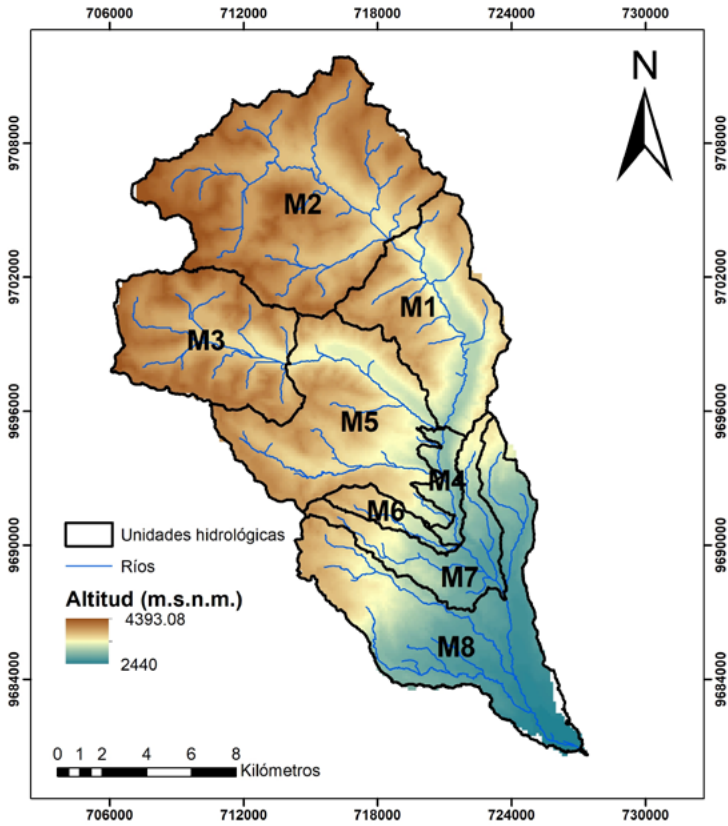


Figura 13. Unidades hidrológicas.

A continuación, se detalla la extensión de las áreas aportantes por microcuenca:

Tabla 12. Áreas aportantes por *catchment*.

Microcuencas	Área (ha)
M1	4238.206
M2	8946.013
M3	4244.283
M4	669.779
M5	5449.878
M6	591.866
M7	2168.021
M8	6191.555

- **Definir coordenadas y cálculo de centroides de las microcuencas**

Es necesario utilizar un *software* de procesamiento geoespacial para definir las coordenadas. La información cartográfica requerida para la creación del esquema del modelo hidrológico debe estar georreferenciada en el Sistema de Coordenadas Geográficas: GCS_WGS_1984; Datum: D_WGS_1984.

Posteriormente, una vez que los *catchments* han sido delimitados, se requiere realizar el cálculo de los centroides de las microcuencas. Esto se logra utilizando la herramienta de geometría para calcular centros de polígonos, como se observa en la Figura de unidades hidrológicas.

- **Cálculo de los porcentajes de área**

Es esencial realizar el cálculo de los porcentajes de área por cobertura de suelo para cada *catchment*. Dado que se considera el cambio de uso del suelo, esta información es necesaria para cada periodo, según la información cartográfica de 2001, 2010 y 2015.

Tabla 13. Porcentaje de área por *catchment* (cobertura de suelo del 2001).

PORCENTAJE DE ÁREA EN CADA CATCHMENT								
Cobertura del suelo 2001	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
Bosque	13.7681	0.0000	0.0000	43.3392	2.8398	19.4718	17.7473	23.1304
Cuerpos de agua	0.0427	1.4462	2.8742	0.0000	0.3338	0.0000	0.0000	0.0000
Erial	0.0000	4.2771	6.4444	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Páramo	66.8971	93.1731	86.4861	5.9039	74.4184	54.8300	21.8956	14.3817
Tierras agropecuarias	6.2022	0.0000	0.0000	33.1656	8.2694	10.1550	51.9626	47.5714
Vegetación arb y herb	13.0900	1.1035	4.1953	17.5912	14.1386	15.5432	8.3945	11.1446
Zona antrópica	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	3.7718
	100	100	100	100	100	100	100	100

Tabla 14. Porcentaje de área por *catchment* (cobertura de suelo del 2010).

PORCENTAJE DE ÁREA EN CADA CATCHMENT								
Cobertura del suelo 2010	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
Bosque	17.3802	0.0000	0.0000	53.1451	1.2904	20.6964	19.7007	22.2325
Cuerpos de agua	0.0054	1.5390	2.7840	0.0000	0.2207	0.0000	0.0000	0.0000
Erial	0.0000	3.6193	4.9775	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Páramo	60.6679	94.4997	89.9178	3.4272	76.3582	54.0579	19.7138	12.4863
Tierras agropecuarias	6.0965	0.0000	0.0000	29.5706	10.5297	12.7367	51.7449	47.7513
Vegetación arb y herb	15.8500	0.3420	2.3207	13.8571	11.6010	12.5090	8.8406	10.7220
Zona antrópica	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	6.8078
	100	100	100	100	100	100	100	100

Tabla 15. Porcentaje de área por *catchment* (cobertura de suelo del 2015).

PORCENTAJE DE ÁREA EN CADA CATCHMENT								
Cobertura del suelo 2015	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
Bosque	16.5719	0.0000	0.0000	37.0582	2.1477	17.8652	14.3855	13.1565
Cuerpos de agua	0.0011	1.4414	3.0089	0.0000	0.2781	0.0000	0.0000	0.0000
Erial	0.0000	3.2792	3.5187	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Páramo	65.8666	94.6959	90.6273	1.3944	72.5902	51.1510	18.8425	12.8881
Tierras agropecuarias	6.5067	0.0000	0.0000	46.6049	12.1154	15.2227	55.5556	56.6863
Vegetación arb y herb	11.0536	0.5835	2.8448	14.9426	12.8686	15.7612	11.2164	11.3983
Zona antrópica	0.0000	0.0000	0.0003	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	5.8708
	100	100	100	100	100	100	100	100

3. Construcción del modelo

3.1. Esquema

La ubicación de los sitios de demanda, los canales de conducción representados por derivaciones, las líneas de conducción y flujo de retorno, entre otros componentes, corresponden a una aproximación geográfica de la ubicación real de los lugares de emplazamiento.

3.1.1. Crear una nueva área

Al establecer una nueva área en blanco, se despliega la ventana Área nueva, tal como se observa en la Figura 14. En esta ventana, se asigna un nombre al proyecto y se selecciona la opción “En Blanco Inicialmente”. Además, es posible redactar una breve descripción del nuevo proyecto.

A continuación, WEAP solicita delimitar el área a trabajar en cualquier parte del mundo, mediante la ventana “Fijar Límites de Área”, como se muestra en la Figura 15.

Figura 14. Ventana para la creación de una Área nueva.

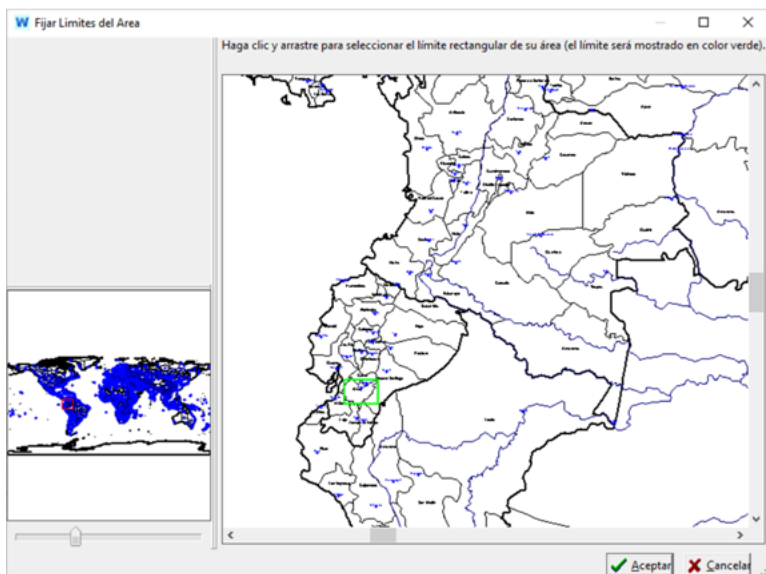


Figura 15. Ventana para Fijar Límites del Área.

3.1.2. Agregar la información cartográfica

Para incorporar información cartográfica, se realiza clic derecho en el cuadro de datos GIS, ubicado debajo de los nodos. Al seleccionar la opción "Agregar Capa Vector" se despliega una ventana que permite abrir archivos *shape* desde cualquier ubicación del ordenador, como se muestra en la Figura 10.

Entre la información cartográfica ingresada se observa lo siguiente:

- Delimitación de las unidades hidrológicas (machangara_microCGS.shp)
- Ríos (ríos-delinear.shp)
- Puntos de ubicación de las estaciones hidrometeorológicas (Estaciones Ch_Lb.shp)
- Puntos de ubicación de importantes componentes del Complejo Machángara (puntos_importantes.shp)
- Puntos de ubicación de los medidores de caudal (medidores.shp)
- Puntos centroides de las microcuencas (8centros_CGS.shp)

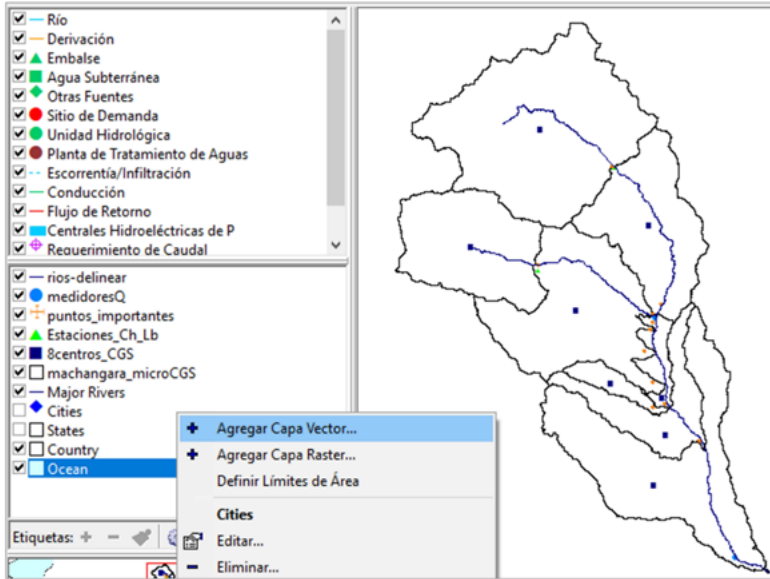


Figura 16. Incorporación de información cartográfica.

3.1.3. Ingreso de nodos al esquema

La información cartográfica proporciona una referencia clave para la ubicación de los componentes del sistema.

El proceso comienza con la delimitación del recorrido de los ríos. Con el cursor presionado sobre el nodo de "Río", se arrastra desde el inicio del río Machángara, en la zona alta de la subcuenca. Luego se suelta el cursor y se lleva a la salida de la subcuenca, donde se termina el trazo con un doble clic. Inmediatamente, se despliega la ventana de "Información General", como se muestra en la Figura 17, en la cual se asigna un nombre al río.

Este proceso se repite para cada componente del sistema, utilizando la información cartográfica como guía para posicionar y conectar los nodos adecuadamente.

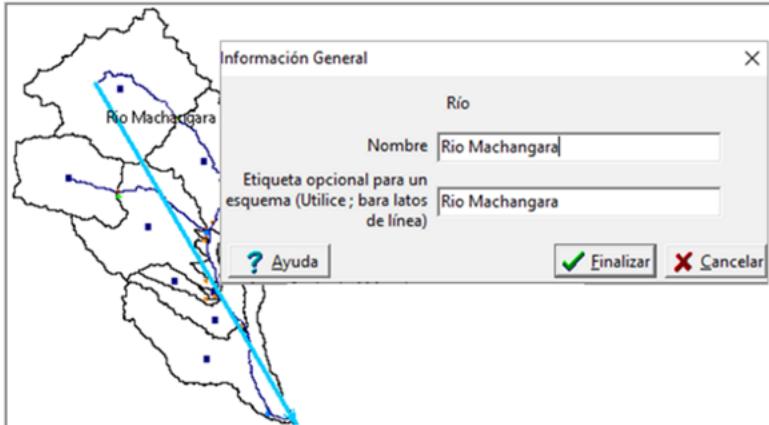


Figura 17. Creación del nodo río Machángara.

De la misma manera, se procede a crear el nodo río para el río Chulco. Este río tiene su inicio en la parte alta de la subcuenca y fluye hasta desembocar en el río Machángara. Durante el trazado del río Chulco, WEAP presenta un mensaje que autoriza que este río desemboque en el Machángara. Se sugiere desmarcar las capas innecesarias al desmarcar el trazo para obtener una vista más clara del *shape* de ríos, como se ilustra en la Figura 18.

Nota: la dirección del trazado de los ríos es muy importante, ya que determina el punto de origen y el lugar de desembocadura de estos cuerpos de agua. En el caso del río Machángara, puede ser al cierre de la cuenca, mientras que en el caso del río Chulco, puede ser como afluente a la corriente principal. Este detalle es crucial para una representación precisa del flujo hidrológico del modelo.

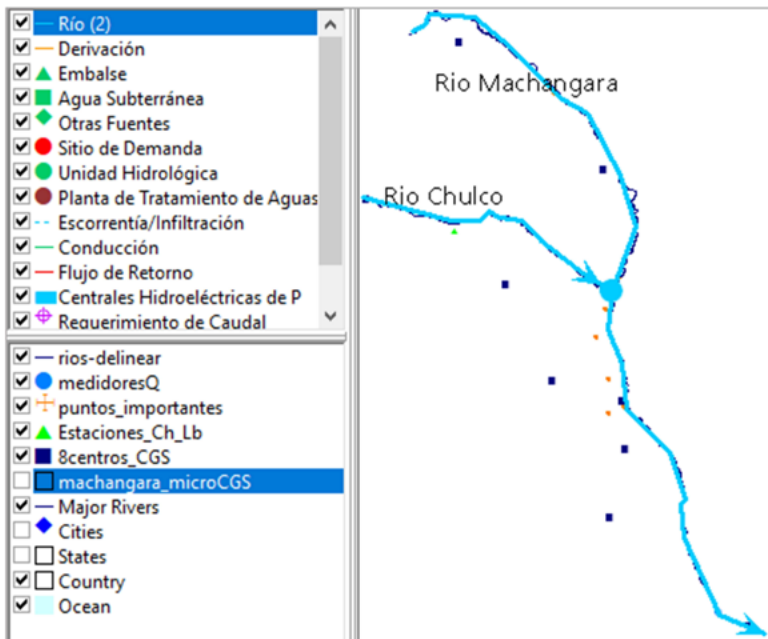


Figura 18. Trazo de ríos Machángara-Chulco.

Luego se debe crear los *catchments* representados por el nodo de Unidad Hidrológica. Para agregarlos a la subcuenca, se coloca el cursor sobre el nodo a utilizar y, con un clic izquierdo y sin soltar, se ubica en el centroide de la microcuenca. Este proceso se repite para los 8 *catchments* en los que se divide el área.

Es importante tomar en cuenta que al crear un *catchment*, WEAP genera una ventana de confirmación que ofrece la opción de utilizar el Modo Delineado de Cuenca. Este modo permite definir la cuenca de captación, incluyendo áreas de ríos, usos de tierra y clima. Se recomienda deshabilitar esta opción haciendo clic en "No", ya que la información alimentada al modelo se basa en mediciones tomadas en estaciones hidrometeorológicas dentro y fuera de la subcuenca del río Machángara.

Una vez creadas las unidades hidrológicas y nombradas según la división de la subcuenca en *catchments*, se procede a vincular cada una de ellas

mediante un nodo de infiltración/escorrentía. Este nodo define dónde deben descargar los flujos de salida del área aportante, como se observa en la Figura 19. Dichos flujos incluyen la escorrentía directa, escorrentía superficial, flujo intermedio y flujo base.

Nota: es importante considerar que cuando el nodo de infiltración/escorrentía está conectado a la cabecera del río, representa la entrada del recurso desde ese punto y se lleva aguas abajo. En el caso de los catchments de la parte alta, no se debe colocar el nodo de infiltración/escorrentía desde la cabecera o punto de inicio de los ríos Machángara y Chulco. Esto se debe a que la información de caudales ingresada en la parte alta de la cuenca se mide en las presas, y el caudal de entrada a estos catchments no representa la cabecera de cuenca de los ríos.

WEAP, siendo un modelo semidistribuido, calcula el balance hídrico de cada área. Los caudales generados en las áreas sirven como aporte a los demás catchments aguas abajo.

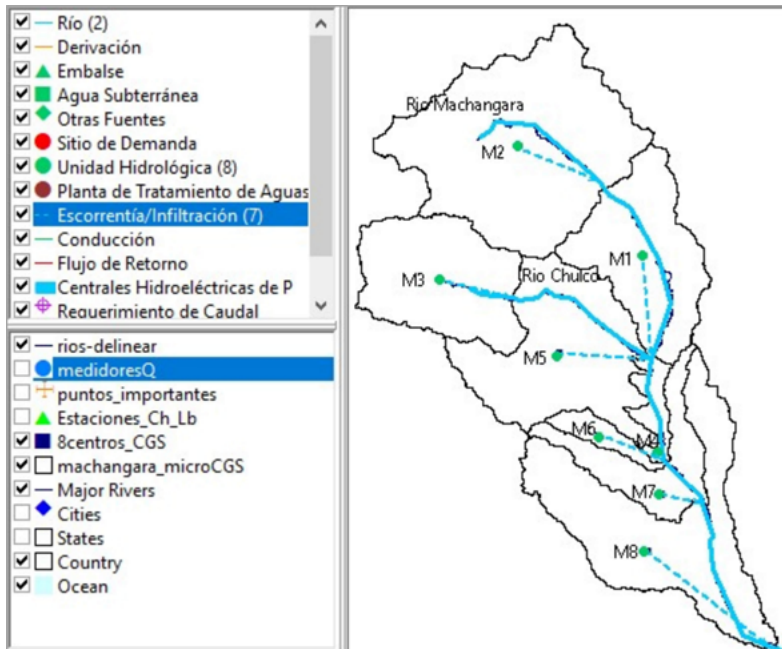


Figura 19. Creación de los catchments.

Para continuar con la creación de los nodos de los demás componentes del complejo, es necesario cargar la capa con la ubicación de los puntos importantes para situar las estructuras en los sitios adecuados, de manera que se asemeje a la distribución geográfica real. Para insertar los nombres de cada punto, se debe dar doble clic en la capa vector puntos_importantes, lo que despliega la ventana "Mapa de estratos". En esta ventana, es posible cambiar la apariencia de los *shapes*. En la etiqueta, se ingresa el campo nombres para que aparezcan los datos de cada punto.

Para insertar un nuevo nodo dentro del área de trabajo, se coloca el cursor sobre el nodo a utilizar y, con un clic izquierdo y sin soltar, se ubica en el lugar correspondiente. A continuación, se debe nombrar y se procede con el siguiente. Los nodos de sitios de demanda deben ser alimentados por nodos de conducción. Aquellas demandas en las que el caudal ingresado no sea consumido en su totalidad deben contar con nodos de flujo de retorno. Esto es evidente en el caso de las demandas para riego, donde, debido a procesos de ineficiencia en el aprovechamiento del recurso no se utiliza al 100%. Por lo tanto, el desperdicio debe ser considerado.

En la Tabla 16 se detallan los nodos utilizados para crear el esquema del modelo final en WEAP, incluyendo los nombres con los que se los diferencian.

Tabla 16. Nodos para generar el esquema.

Demanda	Nodo	Nombre	Nodos complementarios	
			Nodo	Nombre
Embalses	Embalse	Presa El Labrado	Medidor de caudal	Medidor en Lb
			Requerimiento de caudal	Qeco Lb
	Embalse	Presa Chanlud	Medidor de caudal	Medidor en Ch
			Requerimiento de caudal	Qeco Ch
Agua para consumo humano	Sitio de demanda	PTAP Tixán	Conducción	Conducción de Dutasay a PTAP Tixán
	Sitio de demanda	PTAP Patamarca	Conducción	Conducción de Dutasay a PTAP Patamarca
	Sitio de demanda	PTAP Chulco-Soroche	Conducción	Conducción de río Chulco a PTAP Chulco-Soroche
Agua para riego	Sitio de demanda	Canal Che_Sid_Ric	Conducción	Conducción de nodo de retirada 2 a canal Che_Sid_Ric
			Flujo de retorno	Flujo de retorno de canal Che_Sid_Ric a RÍO MACHÁNGARA
	Sitio de demanda	Canal Machángara	Conducción	Conducción de Dutasay a canal Machángara
			Flujo de retorno	Flujo de retorno de canal Machángara a río Machángara
	Sitio de demanda	Canal SR Ricaurte	Conducción	Conducción de Nodo de retirada 3 a canal SR Ricaurte
			Flujo de retorno	Flujo de Retorno de canal SR Ricaurte a río Machángara

Demanda	Nodo	Nombre	Nodos Complementarios	
			Nodo	Nombre
Agua para uso industrial	Sitio de demanda	Emurplag	Conducción	Conducción de nodo de retirada 4 a Emurplag
	Sitio de demanda	Graiman	Conducción	Conducción de nodo de retirada 6 a Graiman
	Sitio de demanda	Cartopel	Conducción	Conducción de nodo de retirada 8 a Cartopel
	Sitio de demanda	ContiGT	Conducción	Conducción de nodo de retirada 5 a ContiGT
	Sitio de demanda	Hormicroto	Conducción	Conducción de nodo de retirada 7 a Hormicroto
Reservorios	Embalse local	Tuñi	Conducción	Conducción de nodo de retirada 9 a Tuñi
			Conducción	Conducción de nodo de retirada 10 a Tuñi
			Derivación	Canal salida Tuñi
	Embalse local	Dutasay	Conducción	Conducción de nodo de retirada 1 a Dutasay
			Derivación	Canal salida Dutasay
			Requerimiento de caudal	Qeco Saymirín

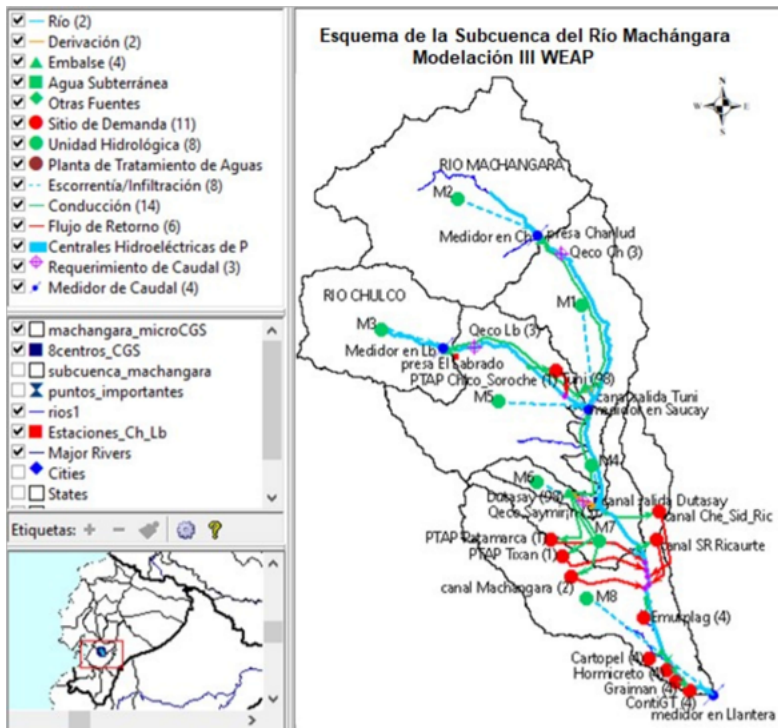


Figura 20. Esquema de la modelación hidrológica de la subcuenca del río Machángara en WEAP.

3.1.4. Definición de prioridades

WEAP satisface la demanda requerida de agua según la prioridad definida, asignando primero a los sitios con mayor prioridad (1 para la prioridad más alta, 99 para la más baja). Por ejemplo, las prioridades de llenado de embalses tienen un valor predeterminado de 99, lo que significa que se llenarán solo si queda agua después de satisfacer todas las demás demandas de mayor prioridad.

Los sistemas de prioridad pueden ser definidos por el usuario para determinar las asignaciones de los suministros a los sitios y cuencas de demanda, así como para los requerimientos de caudal, y/o para llenar depósitos y generar energía hidroeléctrica (SEI, 2009).

Las prioridades han sido definidas de acuerdo a la Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Uso y Aprovechamiento del Agua, Sección Segunda, De los Usos del Agua;

Art. 86.- Agua y su prelación. De conformidad con la disposición constitucional, el orden de prelación entre los diferentes destinos o funciones del agua es:

- a. Consumo humano;
- b. Riego que garantice la soberanía alimentaria;
- c. Caudal ecológico; y,
- d. Actividades productivas.

El agua para riego que garantice la soberanía alimentaria comprende el abrevadero de animales, acuicultura y otras actividades de la producción agropecuaria alimentaria doméstica; de conformidad con el Reglamento de esta Ley (Registro Oficial N.º 305, 2014).

Tabla 17. Definición de prioridades.

Todo escenario	
Sitio de demanda	PD
PTAP (Tixán, Patamarca y Chuco-Soroche)	1
Riego (Machángara, Checa-Sidcay-Ricaurte, SR Ricaurte)	2
Caudal ecológico (Desfogue Chanlud y Labrado, Bypass, Bocacaz, Saymirín)	3
Generación hidroeléctrica (Saucay y Saymirín)	4
Uso industrial (Emurplag, Graiman, Continental, Cartopel, Hormicroto)	4
Tanques de presión (Tuñi y Dutasay)	98
Embalses (Chanlud y Labrado)	99

3.1.5. Unidades

Antes de ingresar los datos que alimentan el modelo, es crucial definir las unidades estándar para garantizar la coherencia en la información.

En este contexto de modelación se establece que:

- La información de caudales debe ser ingresada en m^3/s .
- Los volúmenes en hm^3 o millones de m^3 .
- Los datos de longitud, como elevaciones, deben ser representados en metros.
- La energía debe medirse en kilovatios-hora (kWH).

Esta estandarización de unidades facilitará la consistencia y precisión en los cálculos, contribuyendo así a la confiabilidad y efectividad del modelo hidrológico.

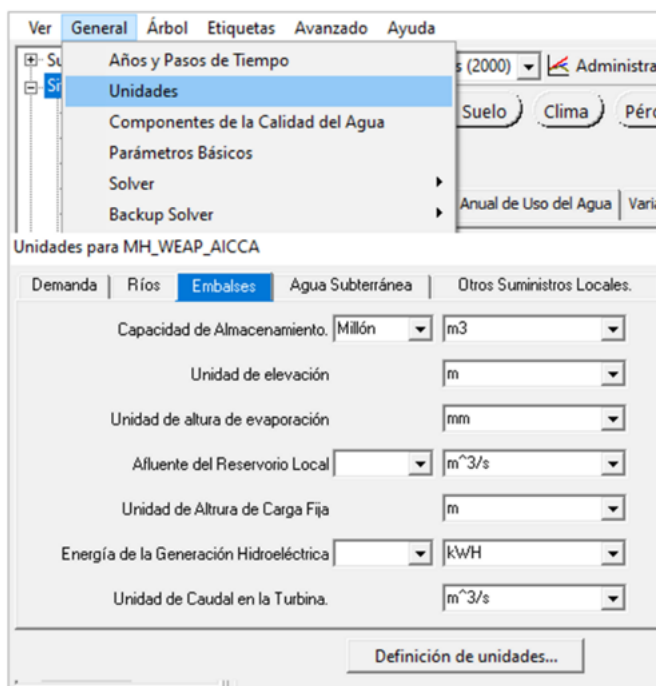


Figura 21. Definición de unidades.

3.2. Ingreso de datos

La información que alimenta el modelo puede presentarse de diversas maneras, ya sea como valores únicos en ciertos casos o como series leídas desde archivos en formato .csv.

En la Figura 22 se ilustra la disposición de un archivo Excel en formato .csv que se introduce en el modelo. Este archivo contiene datos diarios sobre el porcentaje de coberturas de suelo por microcuenca durante un período que abarca desde el primero de enero del 2000 hasta el 31 de diciembre de 2040.

En este ejemplo, se puede observar que la micro cuenca 1, identificada como SAU, incluye coberturas como bosque, cuerpos de agua, páramo, tierras agropecuarias y vegetación arbustiva y herbácea. Cada columna representa un tipo específico de cobertura de suelo, y las filas corresponden a los valores diarios para cada una de ellas a lo largo del período especificado.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	FECHA	Bos SAU	CA SAU	Par SAU	TA SAU	VAH SAU	CA CH	Er CH	Par CH	VAH CH
2	01/01/2000	13.7681	0.0427	66.8971	6.2022	13.09	1.4462	4.2771	93.1731	1.1035
3	02/01/2000	13.7681	0.0427	66.8971	6.2022	13.09	1.4462	4.2771	93.1731	1.1035
4	03/01/2000	13.7681	0.0427	66.8971	6.2022	13.09	1.4462	4.2771	93.1731	1.1035
5	04/01/2000	13.7681	0.0427	66.8971	6.2022	13.09	1.4462	4.2771	93.1731	1.1035
6	05/01/2000	13.7681	0.0427	66.8971	6.2022	13.09	1.4462	4.2771	93.1731	1.1035
7	06/01/2000	13.7681	0.0427	66.8971	6.2022	13.09	1.4462	4.2771	93.1731	1.1035
8	07/01/2000	13.7681	0.0427	66.8971	6.2022	13.09	1.4462	4.2771	93.1731	1.1035
9	08/01/2000	13.7681	0.0427	66.8971	6.2022	13.09	1.4462	4.2771	93.1731	1.1035
10	09/01/2000	13.7681	0.0427	66.8971	6.2022	13.09	1.4462	4.2771	93.1731	1.1035
11	10/01/2000	13.7681	0.0427	66.8971	6.2022	13.09	1.4462	4.2771	93.1731	1.1035
12	11/01/2000	13.7681	0.0427	66.8971	6.2022	13.09	1.4462	4.2771	93.1731	1.1035
13	12/01/2000	13.7681	0.0427	66.8971	6.2022	13.09	1.4462	4.2771	93.1731	1.1035
14	13/01/2000	13.7681	0.0427	66.8971	6.2022	13.09	1.4462	4.2771	93.1731	1.1035
15	14/01/2000	13.7681	0.0427	66.8971	6.2022	13.09	1.4462	4.2771	93.1731	1.1035
16	15/01/2000	13.7681	0.0427	66.8971	6.2022	13.09	1.4462	4.2771	93.1731	1.1035
17	16/01/2000	13.7681	0.0427	66.8971	6.2022	13.09	1.4462	4.2771	93.1731	1.1035
18	17/01/2000	13.7681	0.0427	66.8971	6.2022	13.09	1.4462	4.2771	93.1731	1.1035
19	18/01/2000	13.7681	0.0427	66.8971	6.2022	13.09	1.4462	4.2771	93.1731	1.1035
20	19/01/2000	13.7681	0.0427	66.8971	6.2022	13.09	1.4462	4.2771	93.1731	1.1035

Figura 22. Archivo .csv con datos diarios ingresados al modelo.

En la Figura 23 se presenta la estructura de un archivo Excel en formato .csv que ha sido introducido en el modelo. Este archivo contiene datos anuales

sobre el consumo para las demandas de riego, cubriendo el período desde el 2000 hasta el 2040.

	A	B	C	D
1	AÑO	CONSUMO riego		
2	2000	30.6		
3	2001	30.6		
4	2002	30.6		
5	2003	30.6		
6	2004	30.6		
7	2005	30.6		
8	2006	30.6		
9	2007	30.6		
10	2008	30.6		
11	2009	30.6		
12	2010	30.6		
13	2011	30.6		
14	2012	30.6		
15	2013	30.6		
16	2014	30.6		
17	2015	30.6		
18	2016	30.6		
19	2017	30.6		

ConsumoRiego00-40

Figura 23. Archivo .csv con datos anuales ingresados al modelo.

3.2.1. Sitios de demanda y cuencas

En esta fase se incorpora la información correspondiente a cada *catchment* de manera individual. Se incluyen los datos de uso de agua para cada demanda de consumo, detalles sobre la cobertura de suelo y la información climática asociada.

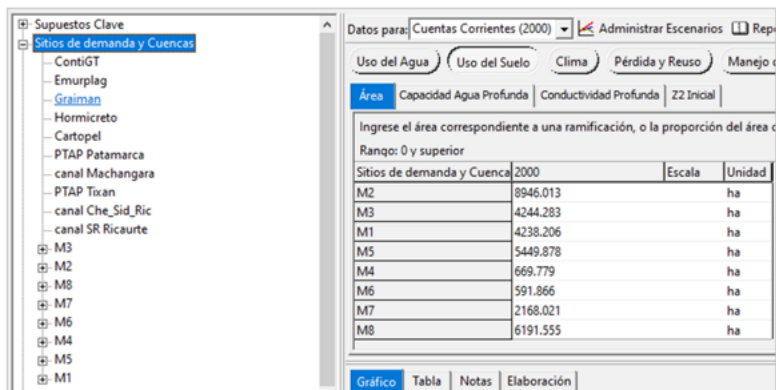


Figura 24. Introducción de datos en sitios de demanda.

3.2.2. Clima

En primer lugar, se incorpora la información climática, abarcando las variables de precipitación, temperatura, humedad relativa, velocidad del viento y la latitud de cada centroide. Dada la falta de cobertura para la información de velocidad del viento y humedad relativa, se calcularon estos valores como promedios de las estaciones hidrometeorológicas de ETAPA, resultando en datos constantes de 1 m/s y 91%, respectivamente.

Las series de precipitación y temperatura constituyen datos diarios que nutren el modelo en cada *catchment* o unidad hidrológica. En las figuras subsiguientes, se presenta la representación gráfica de la precipitación diaria para las 8 microcuencas que conforman el área de estudio (Figura 25). Así mismo, se muestra la gráfica de temperatura diaria de las 8 microcuencas (Figura 26). En ésta última, se puede notar que, desde la parte baja en la microcuenca 8 correspondiente al área en Llantera, el valor de temperatura es mayor. En contraste, en las microcuencas uno, dos y tres correspondientes a Saucay, Chanlud y Labrado respectivamente (ubicadas en la parte alta de la subcuenca), se registra un valor diario de temperatura menor.

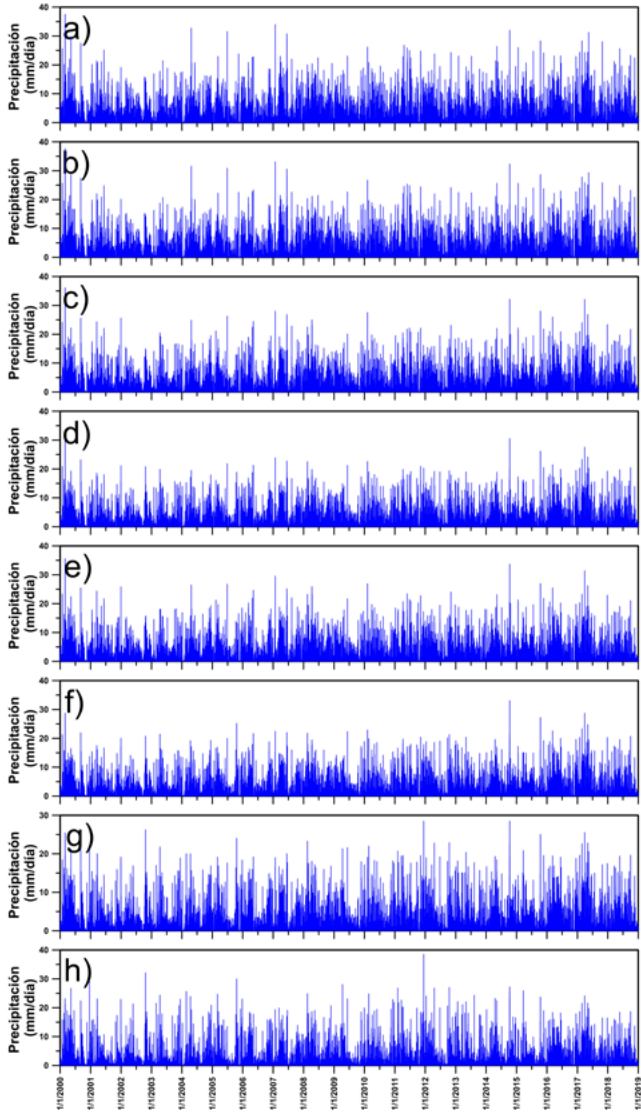


Figura 25. Series de precipitación para las 8 microcuencas.

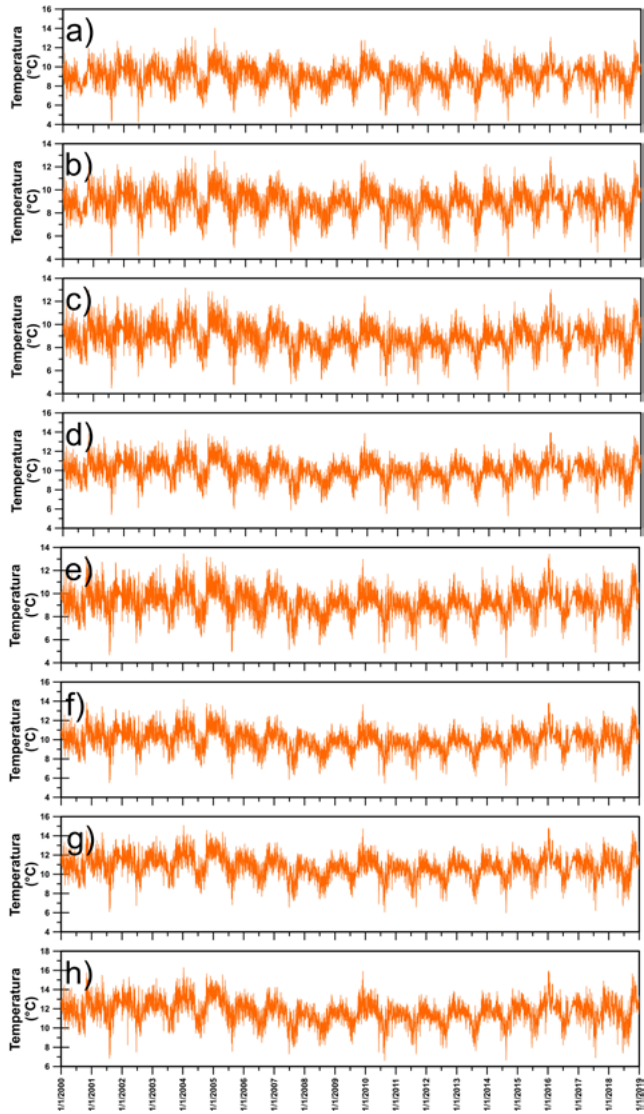


Figura 26. Series de temperatura para las 8 microfrecuencias.

3.2.3. Uso del suelo

Luego se ingresa la información del uso del suelo, en donde se representa el porcentaje de área que representa cada microcuena del total del área de la subcuena.

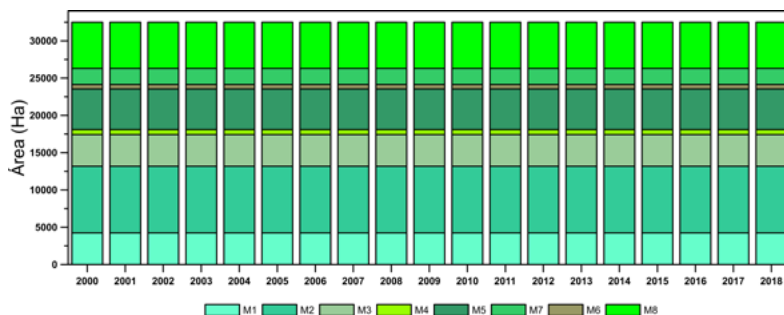


Figura 27. Área por catchments.

Luego en cada microcuena se ingresa el porcentaje de área a la que corresponde cada cobertura del total del área de dicha microcuena.

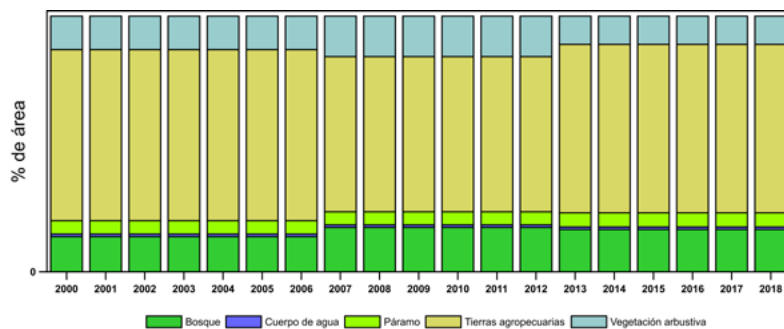


Figura 28. % de Área por cobertura de la M1.

En la Figura 28, por ejemplo, se observa el porcentaje de cada cobertura de suelo que se muestra en el *catchment* M1. La cobertura páramo representa el mayor porcentaje de área en todas las microcuenas, con más del 63%.

3.2.4. Uso del agua

A continuación, se ingresan los datos de uso del agua en los sitios de demanda y cuencas; esta contiene la información de las variables que maneja el modelo de WEAP, las cuales representan el comportamiento de las demandas.

Tabla 18. Información de uso del agua por demandas.

Sitio de demanda	Nivel de actividad anual	Unidades	Tasa de uso anual del agua	Unidades	Variación diaria	% Consumo
PTAP Tixán	382478	per cápita	70.908	m ³ /persona	Proporción diaria	75
PTAP Patamarca	31132	per cápita	70.908	m ³ /persona	Proporción diaria	75
PTAP Chulco-Soroche	24461	per cápita	71.908	m ³ /persona	Proporción diaria	75
CR Machángara	394.89	ha	55103.55	m ³ /ha	Proporción diaria	70
CR Checa-Sidcay-Ricaurte	730	ha	30240	m ³ /ha	Proporción diaria	70
CSR Ricaurte	50	ha	121098.24	m ³ /ha	Proporción diaria	70
EMURPLAG EP	0.000463	m ³ /s	14601.168	m ³ /año	Proporción diaria	100
GRAIMAN	0.009167	m ³ /s	289090.512	m ³ /año	Proporción diaria	100
CARTOPEL	0.044444	m ³ /s	1401585.984	m ³ /año	Proporción diaria	100
Continental Tires	0.005382	m ³ /s	169726.752	m ³ /año	Proporción diaria	100
Hormicreto Cía. Ltda	0.000405	m ³ /s	12772.08	m ³ /año	Proporción diaria	100

3.2.5. Nivel de actividad anual

El nivel de actividad anual corresponde al número de usuarios beneficiados por el agua potable, en el caso de agua para consumo humano, y el área de riego en hectáreas, para cada canal.

En la siguiente Figura se muestran los valores definidos para el nivel de actividad anual correspondiente a las demandas de agua para uso industrial.

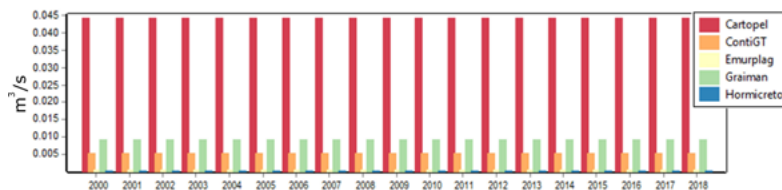


Figura 29. Nivel de actividad anual de las demandas industriales.

3.2.6. Variación diaria

La variación diaria se refiere al porcentaje del recurso que requiere cada demanda. En el caso de todas las demandas, se pueden asignar valores proporcionales al número de días de cada año, logrando esto se consigue dejando con un valor de 0.

3.2.7. Consumo

La variable consumo considera las pérdidas del sistema debido al transporte o uso ineficiente del recurso hídrico. Como se ilustra en la Figura 30, el consumo de agua para las demandas industriales se define con un porcentaje del 100%, indicando que no hay pérdidas en este caso.

Para las plantas de tratamiento de agua potable, el valor de consumo es del 75%, representando un 25% de pérdidas debido al transporte del recurso a lo largo del sistema de abastecimiento de agua potable. Por último, para el agua destinada al uso agrícola, el valor de pérdidas es de aproximadamente el 30%, lo que implica un consumo del 70%. Esta cifra se establece según las deficiencias en el transporte y técnicas de riego.

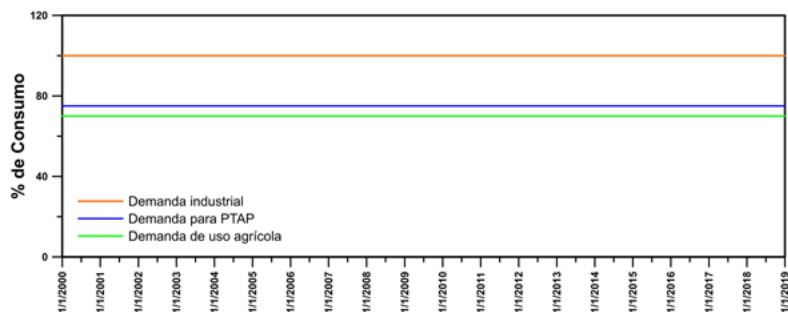


Figura 30. Consumo de las demandas.

3.2.8. Recursos y Suministro

• Río

Dentro de la sección de recursos y suministro, en el nodo de Río, se introduce la información de los caudales de cabecera únicamente para el período de cuentas corrientes, que cubre un año completo al inicio de la modelación, como se muestra en la Figura 31.

En este punto, se ingresan los caudales de entrada a las presas de Chanlud y El Labrado en la zona alta de la cuenca, considerándolos como caudales naturales de recarga. Este paso es crucial para capturar con precisión la dinámica de los recursos hídricos en la cuenca y garantizar una simulación hidrológica integral.

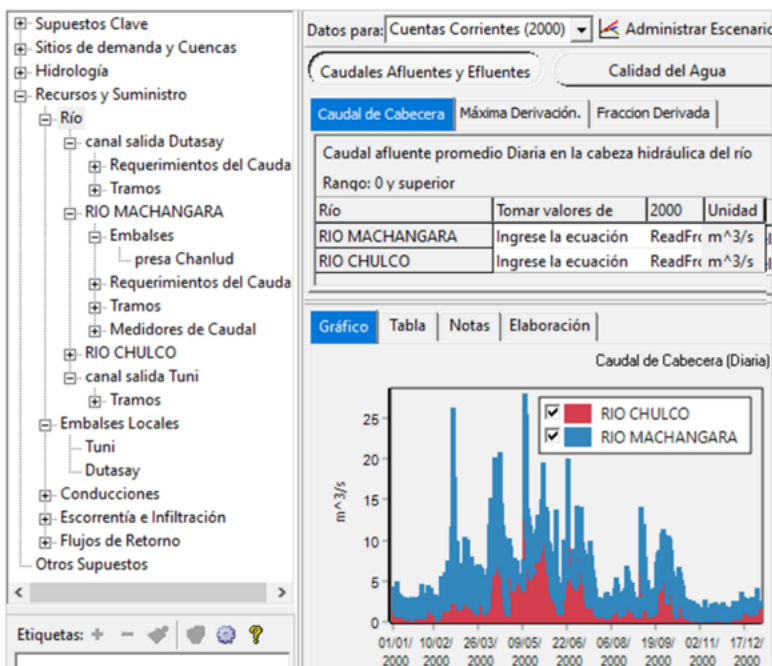


Figura 31. Introducción de información en Recursos y Suministro.

- **Embalses**

En esta sección, se ingresan datos específicos relacionados con la operación de las presas de Chanlud y El Labrado. Esto se realiza únicamente para las variables de modelación Físico y Operación. Es crucial incorporar información detallada sobre la gestión y operación de estas presas para lograr una simulación precisa de la dinámica del agua en la cuenca. Este paso contribuye significativamente a la representación fiel del comportamiento hidrológico del modelo.

Tabla 19. Datos de variables de operación de embalses.

Variables de operación		Presa Chanlud	Presa El Labrado	Unidad
Físico	Capacidad de almacenamiento	16.253372	6.2523259	hm ³
	Almacenamiento inicial	4.941511032	3.409630191	hm ³
	Curva elevación volumen	Valores de volúmenes de almacenamiento a determinado nivel		hm ³ - m
	Máximo efluente hidráulico	Serie de caudal de salida de la presa		m ³ /s
	Volumen observado	Serie de volumen almacenado observado		hm ³
Operación	Parte superior de conservación	16.253372	6.2523259	hm ³
	Parte superior de amortiguamiento	0.518028	0.492997	hm ³

Nota: las variables no abordadas en esta sección pueden mantenerse con los valores predeterminados del modelo.

En la sección de Almacenamiento Inicial, se introducen los valores observados del volumen de almacenamiento en el primer día.

La serie de máximo efluente hidráulico se compone de salidas de las presas, incluyendo el caudal despachado hacia los canales laterales que fluyen hacia Tuñi, el caudal ecológico (90 l/s para Chanlud y 45 l/s para Labrado), y el caudal de desbordamiento generado por el vertido en las presas.

En las variables de operación, la parte superior de conservación se determina a partir de la relación entre la elevación volumen de las presas, representando el volumen máximo que puede contener cada embalse, igual a su capacidad total de almacenamiento. En Chanlud, el nivel máximo se alcanza a los 37m, mientras que, en Labrado, el nivel máximo es a los 12.76 m, ambas elevaciones ubicadas en la cota de 425 m.

El volumen en la parte superior de amortiguamiento corresponde al volumen presente en el nivel mínimo de operación. En Chanlud el nivel mínimo de operación se sitúa a los 4 m, y en Labrado, el nivel mínimo se establece a los 1.6 m. Estos valores son esenciales para modelar la variabilidad en los niveles de agua y garantizar la representación precisa de la operación de las presas en el sistema hidrológico.

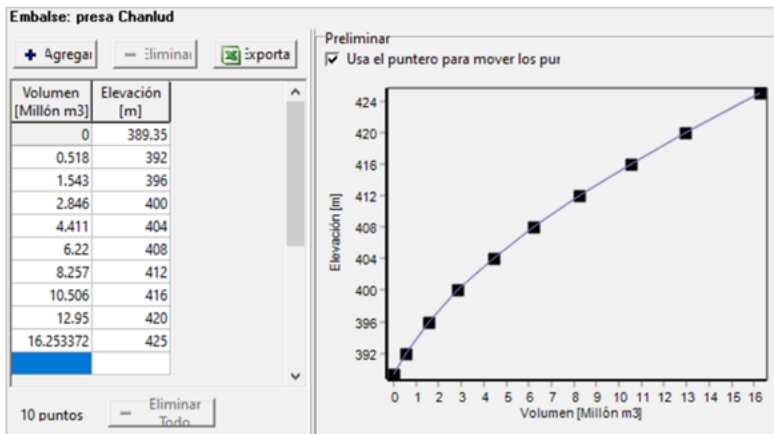


Figura 32. Información de la relación Elevación-Volumen de la presa Chanlud.

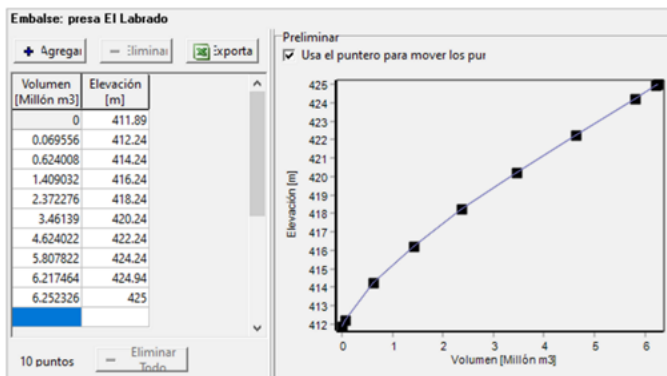


Figura 33. Información de la relación Elevación-Volumen de la presa El Labrado.

• Embalses locales

Los embalses locales representan a los tanques de presión y las centrales de generación hidroeléctrica (GHE) a las cuales alimentan como una sola unidad.

Tabla 20. Datos de variables de operación de embalses locales.

Variables de operación		Reservorio Tuñi	Reservorio Dutasay	Unidad
Físico	Capacidad de almacenamiento	0.02317711	0.02510624	hm³
	Almacenamiento inicial	0.01674686	0.01431563	hm³
	Máximo efluente hidráulico	Serie de caudal turbinado		m³/s
	Volumen observado	Serie de volumen almacenado observado		hm³
Operación	Parte superior de conservación	0.02317711	0.02510624	hm³
	Parte superior de amortiguamiento	0	0	hm³
	Parte superior de volumen inactivo	0	0	hm³
Generación hidroeléctrica	Máximo caudal de turbina	6.76	8.386	m³/s
	Elevación del agua	4.44	4.87	m
	Demanda de energía	Serie de energía bruta		kWh
	Eficiencia en la generación	97	97	%

Nota: las variables que no se presentan en esta sección, han sido dejadas con el valor por defecto del modelo.

En la sección de Almacenamiento Inicial, se ingresan los valores observados del volumen de almacenamiento en el primer día.

En las variables de operación, la parte superior de conservación se determina a partir de la elevación volumen de los tanques, representando el volumen máximo que puede conservar cada reservorio. En el tanque de presión Tuñi, el nivel máximo se alcanza a los 4.44 m, altura en la cual se ingresa la cota de 425m que representa la caída neta para la generación hidroeléctrica. En Dutasay, el nivel máximo es a los 4.87 m y la cota asociada a esta altura es de 212m, también debido a la caída neta para la generación. Ambos niveles reflejan la capacidad total de almacenamiento.

El volumen de la parte superior de amortiguamiento corresponde al volumen que se tiene en el nivel mínimo de operación. Según técnicos de ElecAustro, este valor se da a los 0 m. Estos datos son cruciales para modelar de manera precisa la variación entre los niveles de agua y garantizar la representación adecuada de la operación de los tanques de presión en el sistema hidrológico.

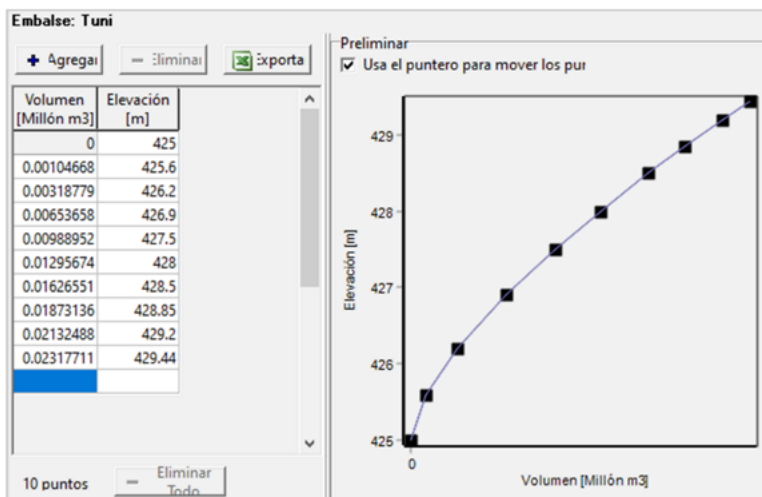


Figura 34. Información de la relación Elevación-Volumen del tanque de presión Tuñi.

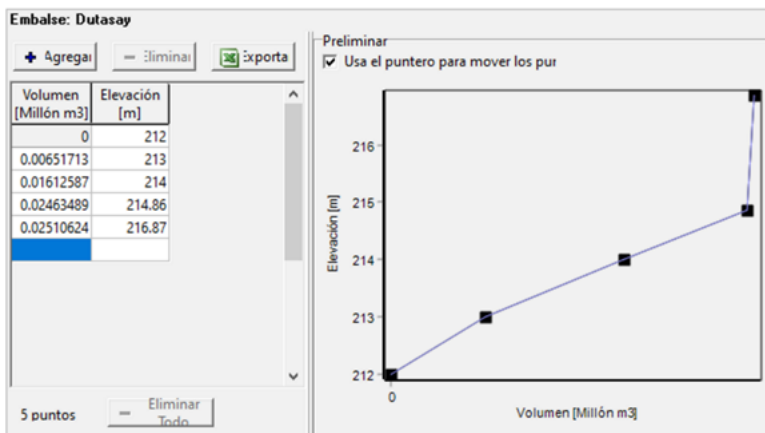


Figura 35. Información de la relación Elevación-Volumen del tanque de presión Dutasay.

Debido a que se han definido valores máximos de caudal en las conducciones que llevan el flujo hacia los tanques de presión, ya no es necesario el ingreso de caudales afluentes.

El ingreso a Tuñi se compone de los caudales afluentes desde las presas. El caudal de diseño del canal Chanlud-Tuñi es de $4.8 \text{ m}^3/\text{s}$ con una eficiencia de 73 %, mientras que para el canal Labrado-Tuñi, el máximo valor permitido es de $2.4 \text{ m}^3/\text{s}$ con una eficiencia del 95 %. Estos valores se definen en los nodos de conducción que representan estos canales laterales de llegada al reservorio Tuñi.

El canal lateral que alimenta al reservorio Dutasay se denomina Bocacaz, con una eficiencia del 95 %, y una restricción de máximo caudal de transporte o caudal de diseño de $8.4 \text{ m}^3/\text{s}$.

En la Figura 36, de máximo efluente hidráulico, las series representan los caudales turbinados simulados para las centrales de Saucay y Saymirín. De esta manera, el efluente hidráulico corresponde al caudal turbinado a la salida de las centrales hidroeléctricas.

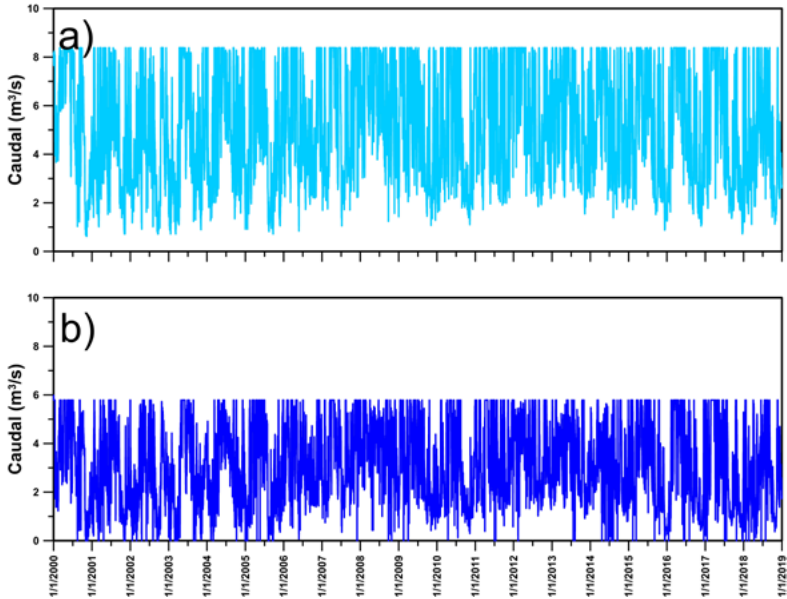


Figura 36. Series de máximo efluente hidráulico de los embalses locales

- **Medidores de caudal y requerimiento de flujo**

En los nodos de medidores de flujo, se introduce la información observada de caudal en diferentes puntos de medición distribuidos dentro de la subcuenca. Los medidores ubicados en Chanlud y Labrado cumplen la función de puntos de aforo, esenciales para cerrar el balance hídrico en las microcuencas altas.

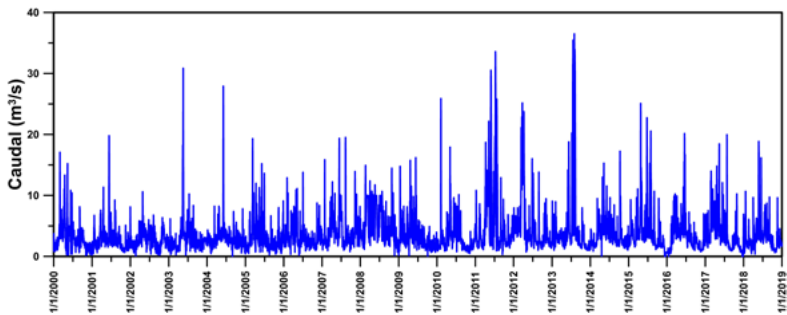


Figura 37. Información de caudal en medidor en Chanlud.

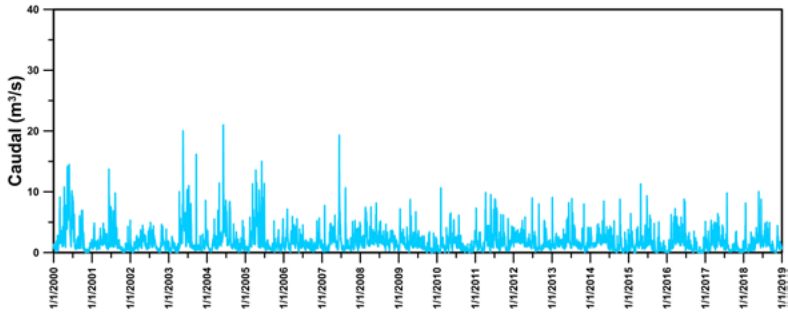


Figura 38. Información de caudal en medidor en Labrado.

Además, se tienen valores de caudal mínimo requerido definidos por los nodos de requerimiento de caudal, los cuales representan el caudal ecológico necesario en el punto específico en el que se colocó dicho nodo. Por ejemplo, se establece un caudal ecológico mínimo de 90 l/s en la salida de la presa Chanlud, de 45 l/s en la salida de la presa El Labrado, y de 235 l/s a la salida de la central Saymirín hacia el río.

3.3. Creación de escenarios para calibrar y validar el modelo

Después de revisar minuciosamente la información que alimenta el modelo, se procede a establecer un escenario para analizar el desempeño del modelo mediante la calibración y validación. Este proceso implica la comparación entre los caudales simulados por el modelo y los caudales observados al ingreso de las presas.

En esta etapa, el objetivo es alcanzar una combinación óptima de parámetros hidrológicos y operacionales que reflejen de manera precisa el comportamiento del Complejo Hidroeléctrico Machángara. Siguiendo, para la explicación del periodo de la modelación, se divide el período histórico en función de los distintos escenarios de cambio en las coberturas del suelo.

Se sugiere la creación de un único escenario para la calibración y validación, ajustando únicamente el paso de tiempo para cada escenario. Esta práctica facilita el análisis del desempeño del modelo y permite evaluar cómo se comporta frente a diferentes condiciones.

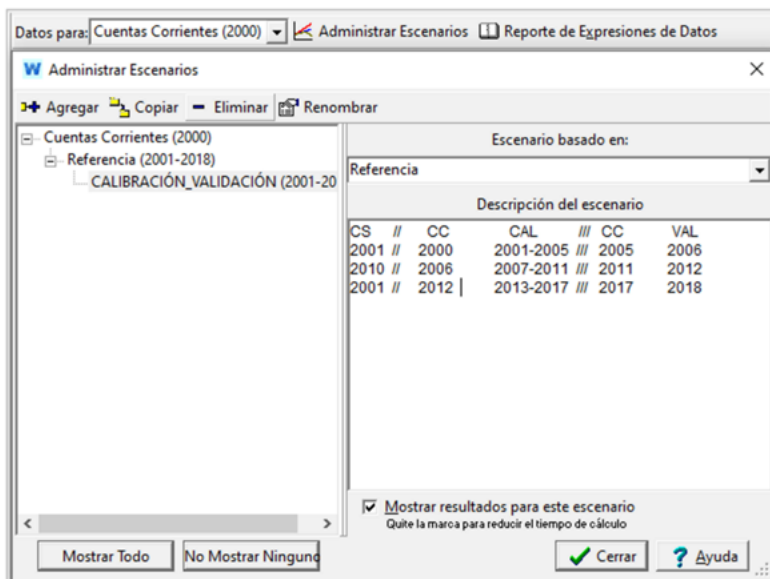


Figura 39. Creación del escenario para calibrar y validar el modelo.

Como se ilustra en la Figura 41, el escenario de referencia, fundamentado en cuentas corrientes, contiene toda la información del período de modelación desde el 2000 hasta el 2018. Por otro lado, el nuevo escenario de calibración y validación se deriva del escenario de referencia.

3.3.1. Parámetros de uso del suelo

A continuación, se presentan los parámetros de uso del suelo manejados en WEAP, los mismos deben ser modificados durante el proceso de calibración, en función de datos específicos de la zona de estudio.

- Kc: coeficiente de cultivo
- Capacidad de almacenamiento de agua en la zona de raíces, Sw
- Capacidad de almacenamiento de agua en la zona profunda, Dw
- Factor de resistencia a la escorrentía, RRF

- Conductividad de zona de raíces, Ks
- Conductividad de zona profunda, Kd
- Dirección preferencial de flujo, f

Los valores asignados para Kc se indican en la siguiente tabla:

Tabla 21. Coeficientes de cultivo Kc.

Tipo de Suelo	Kc
Bosque	0.95
Cuerpos de agua	1.25
Erial	0.2
Páramo	0.86
Tierra agropecuaria	0.9
Vegetación arbustiva y herbácea	1
Zona antrópica	0.7

Fuente: Angarita & Mehta (2016), Carrillo-Rojas et al. (2019), FAO56 (2006).

La información bibliográfica utilizada para el proceso de calibración, proviene de estudios en cuencas de alta montaña con coberturas extensas de páramo y otros tipos de suelo, semejantes a la zona de estudio. Algunas consideraciones clave tomadas en cuenta incluyen:

- El páramo en los Andes se caracteriza por su baja presión atmosférica, alta radiación UV y eventos de vientos fuertes de dirección variable.
- La temperatura en el páramo disminuye con un gradiente entre 0.5 y 0.7 °C por cada 100 m y presenta una temperatura promedio de 7°C a 35 00 m de altura (Córdova et al., 2013)

Para las cuencas andinas ecuatorianas de altitud elevada, no se ha identificado evidencia de percolación profunda o recarga de aguas subterráneas profundas, debido a la presencia del producto de roca madre impermeable subyacente de compactación glacial (Ramon-Reinozo, et al., 2019).

El páramo, caracterizado por su lenta respuesta hidrológica y una eficiente regulación del agua, presenta una combinación única de alta capacidad de almacenamiento de agua y una elevada conductividad (Buyeart, et al, 2005).

La capacidad de almacenamiento y la alta capacidad saturada de los suelos de paramo natural, junto con la baja intensidad de precipitación, resultan en una pequeña contribución de la escorrentía superficial a la respuesta hidrológica. Además, se destaca que el aumento de la conductividad del suelo puede acelerar la respuesta hidrológica, lo que lleva a una disminución rápida del flujo base (Buyeart, et al, 2005).

Parámetros como la dirección preferencial de flujo (f) y la conductividad de zona profunda (K_d) están relacionados de manera no lineal. Un ajuste en uno de estos parámetros puede afectar indirectamente a los otros. Por ejemplo, aumentar la conductividad hidráulica de la zona profunda, K_d , puede incrementar la descarga de perfiles profundos, y, por ende, aumentar los caudales base. Por otro lado, incrementar la capacidad hídrica del perfil superior, S_w , pueden generar un mayor flujo subsuperficial y, consecuentemente, aumentar los caudales máximos. El parámetro de la capacidad de retención de humedad profunda (D_w), regula la transmisión de los flujos a los caudales base (CCGUCC y SEI, 2009).

- **Escenario 1 (cobertura del suelo del 2001)**

Calibración

La fase de calibración para el Escenario 1, que refleja la cobertura del suelo del 2001, se lleva a cabo durante un período de 5 años, desde el 2001 hasta el 2005. Este proceso se fundamenta en los datos del año de cuentas corrientes correspondientes al 2000.

Incrementos de años y tiempos

Horizonte de tiempo
 Año de Cuentas corrientes: 2000
 Último Año de Escenarios: 2005

Pasos de Tiempo por Año
 365
 ¿Agregar Días Bisiestos?

Límite del incremento de tiempo
 Basado en un calendario mensual
 Todos los pasos de tiempo son de igual longitud
 Establezca la longitud del incremento

Año de Inicio del Agua:
 1 Ene

#	Título	Abreviar	Longitud	Inicio	Final
1	1 Ene	1 Ene	1	1 Ene	1 Ene
2	2 Ene	2 Ene	1	2 Ene	2 Ene
3	3 Ene	3 Ene	1	3 Ene	3 Ene
4	4 Ene	4 Ene	1	4 Ene	4 Ene
5	5 Ene	5 Ene	1	5 Ene	5 Ene
6	6 Ene	6 Ene	1	6 Ene	6 Ene
7	7 Ene	7 Ene	1	7 Ene	7 Ene
8	8 Ene	8 Ene	1	8 Ene	8 Ene
9	9 Ene	9 Ene	1	9 Ene	9 Ene

Formato Nombre Paso de Tiempo: 1 Oct

El periodo de estudio será de 1 Ene, 2000 a 31 Dic, 2005.

Ayuda Cerrar

Figura 40. Delimitación del paso de tiempo para la calibración 1.

A continuación, se presentan los valores de calibración por *catchment*:

Tabla 22. Valores de los parámetros de calibración por *catchment*.

Parámetro	Cobertura de suelo	M1, M2, M4, M5, M6, M7, M3, M8	
		Valor de calibración	Valor de calibración
Capacidad de almacenamiento de agua en la zona profunda (Dw) [mm]		100	20
Conductividad de la zona profunda (Kd) [mm/día]		150	150

Capacidad de almacenamiento de agua en la zona de raíces (Sw) [mm]	Cuerpos de agua	95
	Páramo	120
	Bosque	115
	Zona antrópica	75
	Tierras agropecuarias	100
	Erial	80
	Vegetación arbustiva y herbácea	110
Factor de resistencia a la escorrentía (RRF)	Cuerpos de agua	5
	Páramo	8
	Bosque	4
	Zona antrópica	2
	Tierras agropecuarias	3
	Erial	1
	Vegetación arbustiva y herbácea	4
Conductividad de zona de raíces (Ks) [mm/día]	Cuerpos de agua	420
	Páramo	400
	Bosque	400
	Zona antrópica	300
	Tierras agropecuarias	350
	Erial	375
	Vegetación arbustiva y herbácea	350
Dirección preferencial de flujo (f)	Cuerpos de agua	0.5
	Páramo	0.1
	Bosque	0.4
	Zona antrópica	0.9
	Tierras agropecuarias	0.5
	Erial	0.8
	Vegetación arbustiva y herbácea	0.3

Los valores de calibración utilizados en este proceso se basan en la información bibliográfica proveniente de cuencas con características similares en términos de cobertura de suelo, niveles de elevación y latitudes. La calibración se lleva a cabo específicamente en las microcuencas de Machángara Alto (M2) y Chulco (M3). Los valores óptimos resultantes de la calibración en estas microcuencas se extrapolan y se aplican a las demás microcuencas. Este enfoque es adoptado debido a la falta de información medida en puntos específicos de la subcuenca, permitiendo una representación más precisa de las condiciones hidrológicas y operacionales en toda la región de estudio.

Al ejecutar el modelo y revisar los resultados en la vista correspondiente, se generan series de caudal simuladas Y, en comparación con los datos observados durante la validación 1.

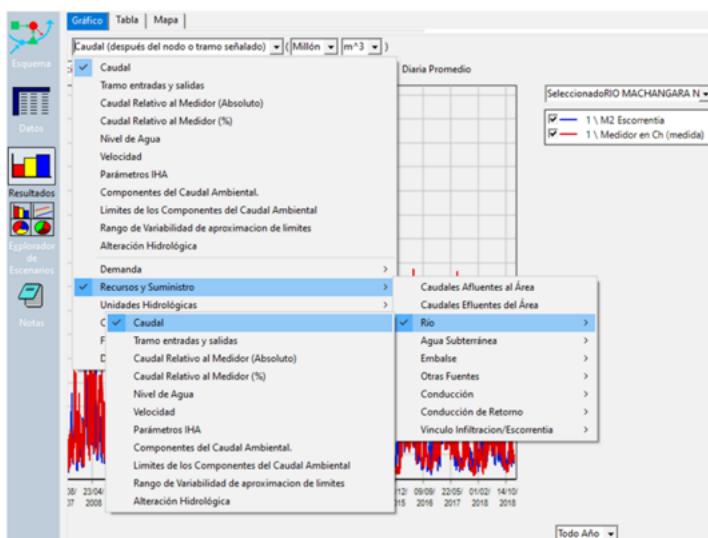


Figura 41. Obtención de resultados de caudales.

En la Figura 42 y la Figura 43 se pueden observar los caudales observados vs simulados en el escenario 1 de calibración para las *catchments* M2 y M3.

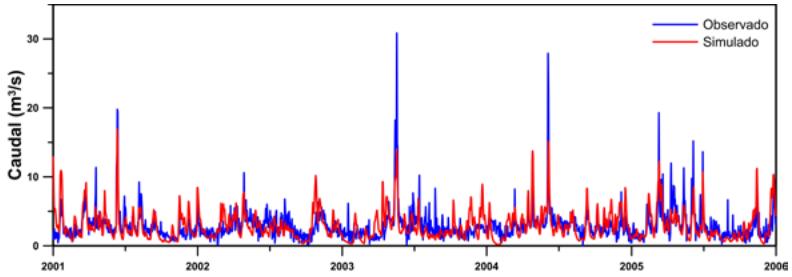


Figura 42. Hidrograma del flujo simulado vs observado de M2, Calibración 1.

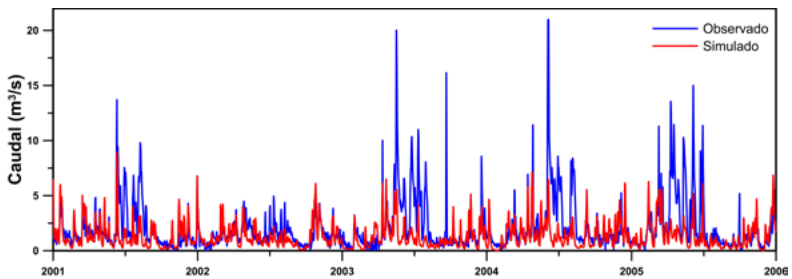


Figura 43. Hidrograma del flujo simulado vs observado de M3, Calibración 1

Una vez configurados los parámetros y ejecutado el modelo, se procede a evaluar su desempeño utilizando la función de resultados en WEAP. Durante este proceso, WEAP detendrá la simulación si falta algún parámetro crítico, proporcionando un mensaje para alertar al usuario sobre la necesidad de completar la información faltante.

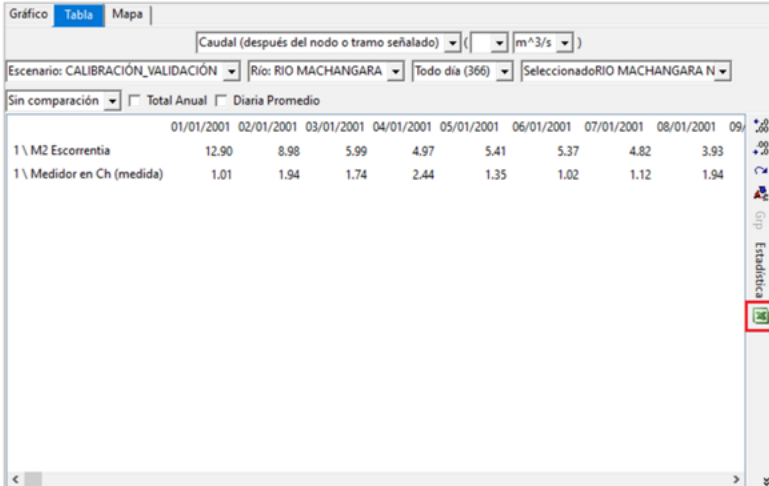


Figura 44. Exportar tabla de resultados.

La opción de "Tabla de Resultados" en WEAP proporciona un desglose detallado de los caudales simulados para cada día. Esta información es esencial para realizar análisis de bondad de ajuste mediante la comparación de los caudales simulados con los datos observados.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Caudal (después del nodo o tramo señalado) (m ³ /s)								
2	SeleccinadorRIO MACHANGARA Nodos y Tramos (2/54), Escenario: CALIBRACIÓN_VALIDACIÓN, Río: RIO MACHANGARA, Todo día (366)								
3									
4		01/01/2001	02/01/2001	03/01/2001	04/01/2001	05/01/2001	06/01/2001	07/01/2001	08/01/2001
5	1 \ M2 Escorrentia	12.8994213	8.980358796	5.985428241	4.967337963	5.409016204	5.370949074	4.81505787	3.929282407
6	1 \ Medidor en Ch (medida)	1.012140174	1.93757364	1.740146294	2.436860547	1.348572774	1.016629684	1.115068632	1.943069543
7									
8									

Figura 45. Archivo Excel de los resultados exportados desde WEAP.

Nota: es importante considerar únicamente el período de calibración sin el año de calentamiento o cuentas corrientes para el cálculo de las métricas de bondad de ajuste.

El cálculo del desempeño del modelo puede ser desarrollado en el *software* R Studio mediante el empleo de la librería hidroGoF. Esta librería dispone de funciones específicas para la comparación de series temporales hidrológicas

simuladas y observadas. En la siguiente tabla, se muestran todas las métricas de bondad de ajuste calculadas por el complemento *Goodness-of-fit*.

Tabla 23. Índices de eficiencia en R del desempeño de la calibración 1 para M2 y M3.

Catchment M2		Catchment M3	
ME	0.03	ME	-0.71
MAE	1.30	MAE	1.15
MSE	3.39	MSE	4.25
RMSE	1.84	RMSE	2.06
NRMSE %	85.20	NRMSE %	91.60
PBIAS %	0.90	PBIAS %	-34.60
RSR	0.85	RSR	0.92
rSD	1.00	rSD	0.53
NSE	0.27	NSE	0.16
mNSE	-0.01	mNSE	0.22
rNSE	-1.58	rNSE	-0.51
d	0.79	d	0.61
md	0.55	md	0.57
rd	0.26	rd	0.31
cp	-0.31	cp	-1.75
r	0.64	r	0.51
R2	0.41	R2	0.26
bR2	0.35	bR2	0.12
KGE	0.64	KGE	0.24
VE	0.55	VE	0.44

Es importante guardar las versiones anteriores para tener la capacidad de retroceder a los movimientos previos. Esta función se puede realizar seleccionando la opción *Área/Guardar Versión* e introduciendo la información de referencia de la versión, tal como se muestra en la Figura 45. Luego, confirme la creación de la versión para completar el proceso.

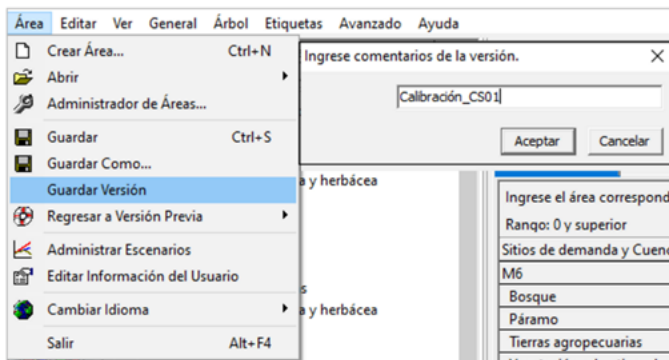


Figura 46. Guardar versiones.

Validación

Después de llevar a cabo la calibración del modelo, el siguiente paso es validar, ajustando el paso del tiempo al periodo correspondiente y manteniendo los parámetros de calibración junto con la información pertinente para este paso temporal específico. La fase de validación para este escenario de cobertura de suelo abarca un total de 1 año (2006) y se realiza de manera similar al proceso de calibración.

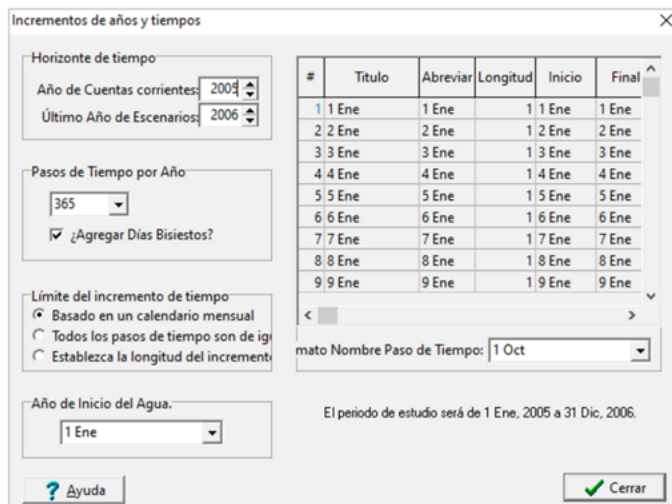


Figura 47. Delimitación del paso de tiempo para la validación 1.

Debido a que nos encontramos en otro paso de tiempo y el año de cuentas corrientes ahora es 2005, se ajusta el caudal de cabecera en la opción de Recursos y Suministro / Río, con el fin de visualizar las series de caudal para este periodo específico.

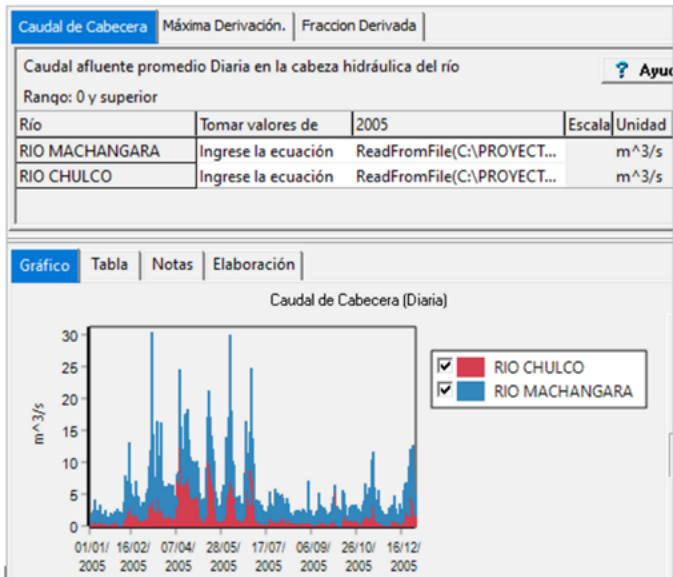


Figura 48. Cambio de información de caudal de cabecera para la validación 1.

En la Figura 49 y la Figura 50 se pueden observar las series de caudales observados vs simulados en el escenario 1 de validación para los *catchments* M2 y M3.

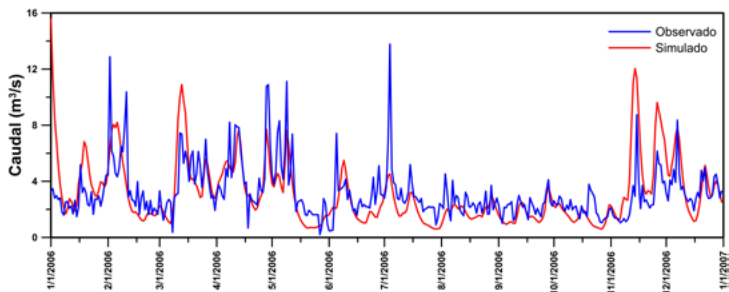


Figura 49. Hidrograma del flujo simulado vs observado de M2, Validación 1.

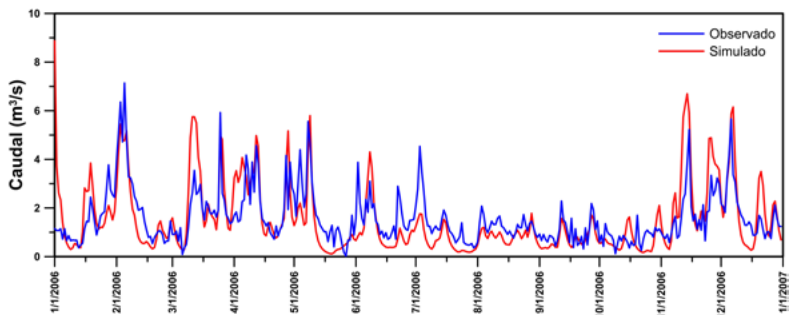


Figura 50. Hidrograma del flujo simulado vs observado de M3, Validación 1.

Repetir este proceso para los escenarios 2 y 3 de cambio de la cobertura de suelo de 2010 y 2015 respectivamente.

3.4. Resultados

3.4.1. Resultados de Calibración y Validación

Para evaluar el desempeño del proceso de modelación, se deben definir las medidas de bondad de ajuste con las cuales calificar el rendimiento, en este caso son el KGE y PBIAS. Las dos métricas sirven para comparar la variabilidad de las series de aportación observadas con las estimadas por un modelo (Cabrera, 2017). En cuanto al KGE, presenta una eficiencia entre 0 y 1, consiguiendo una simulación perfecta con un valor de 1; por el contrario, valores cercanos a 0 representan una simulación deficiente. En cuanto al PBIAS, si el ajuste es perfecto, el valor obtenido es igual a 0.

Tabla 24. Índices de evaluación del desempeño.

Cobertura del suelo	Escenario	CHANLUD		LABRADO	
		KGE	PBIAS	KGE	PBIAS
2001	Calibración	0.64	0.9	0.24	-34.6
	Validación	0.52	-1.9	0.57	-3.9

2010	Calibración	0.58	-10.7	0.79	-3.8
	Validación	0.51	-0.3	0.65	1.5
2015	Calibración	0.38	-2	0.74	10.4
	Validación	0.67	5.6	0.64	-8

Según los resultados de KGE, las modelaciones están entre Buena, Satisfactoria e incluso Insatisfactoria; mientras que, según el PBIAS, los resultados son Muy Buenos, Buenos, Satisfactorios e Insatisfactorios. Depende del modelo y dentro de este, de cada escenario de cambio de cobertura del suelo.

Tabla 25. Calificación del rendimiento de un modelo

Clasificación del Rendimiento	PBIAS	KGE
MUY BUENO	$PBIAS < \pm 10$	$0.9 \leq KGE \leq 1$
BUENO	$\pm 10 \leq PBIAS < \pm 15$	$0.75 \leq KGE < 0.9$
SATISFACTORIO	$\pm 15 \leq PBIAS < \pm 25$	$0.5 \leq KGE < 0.75$
INSATISFACTORIO	$PBIAS \geq 25$	$KGE < 0.5$

Fuente: Kouchi, et al. (2017).

Una vez calibrados y validados los escenarios históricos simulados del modelo hidrológico, se ingresan los parámetros de calibración en el escenario de Referencia, y se cambia el paso de tiempo de manera que cubra todo el periodo histórico del 2000 al 2018, con el propósito de analizar los caudales de aportantes y la cobertura de las demandas.

Tabla 26. Índices de eficiencia en R del desempeño para M2 y M3 (2000-2018) para la modelación III.

GoF	M2	M3
PBIAS %	-6.1	-10.8
KGE	0.51	0.57

Según la calificación del modelo en función de los índices de bondad de ajuste (Kouchi, et al, 2017), los resultados de KGE demuestran que la modelación es **SATISFACTORIA**; mientras que, según el PBIAS, los resultados reflejan una modelación entre **MUY BUENA** y **BUENA**.

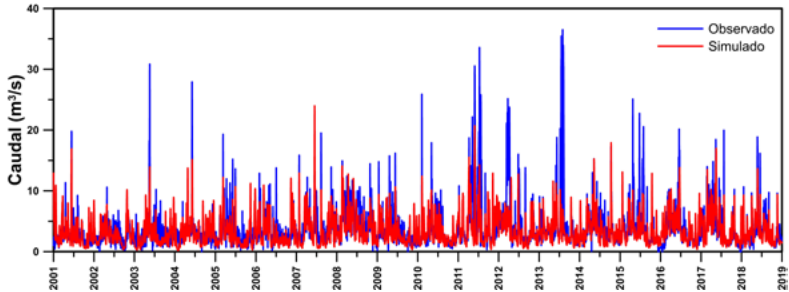


Figura 51. Hidrograma del flujo simulado vs observado de M2.

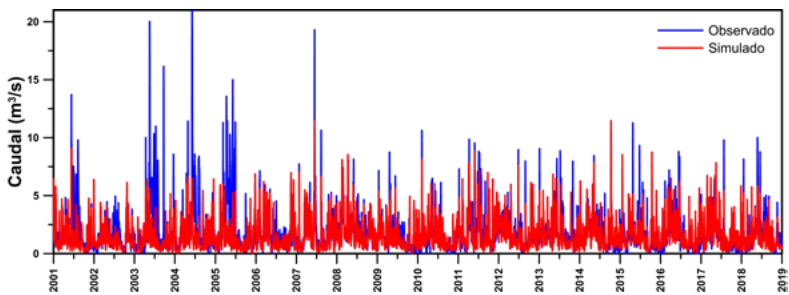


Figura 52. Hidrograma del flujo simulado vs observado de M3.

3.4.2. Resultados de las demandas

En la vista Resultados/Gráfico, en la opción Demanda, se analizan las demandas ingresadas al modelo. Es importante seleccionar los ramales que se requieren, como es el caso de las demandas de agua para consumo humano en las PTAP, para riego en los canales e industrial.

Como se observa en la siguiente Figura, WEAP permite considerar algunas variables relacionadas a las demandas de agua, así como algunas referentes a la Cobertura de Caudales.

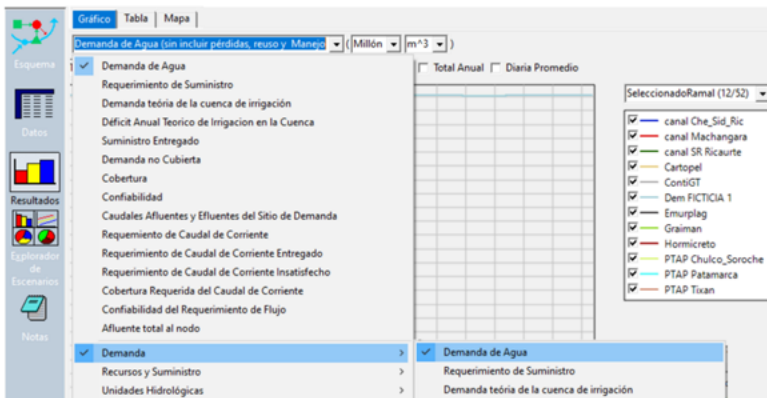


Figura 53. Obtención de resultados de Demandas de Agua.

Según la información ingresada en los sitios de demanda, el requerimiento de agua para las demandas se presenta de manera constante. La planta de tratamiento de agua potable Chulco-Soroche inició sus operaciones a finales del año 2015, por lo que se considera en la modelación desde el año 2016.

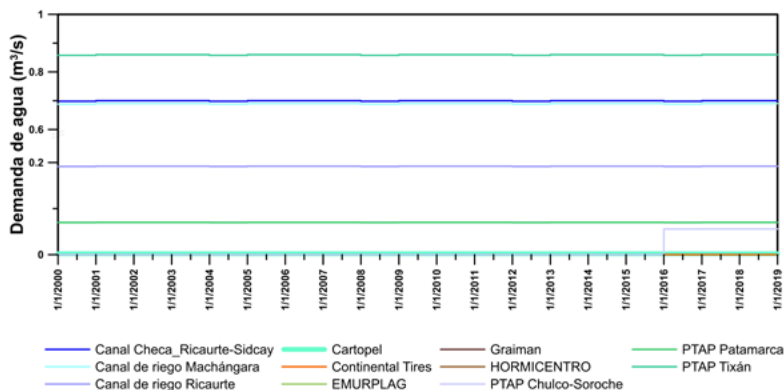


Figura 54. Demandas de agua.

3.4.3. Resultados de la generación de energía hidroeléctrica

En la vista Resultados/Recursos y Suministro/Embalse, en la opción Generación Hidroeléctrica (GHE), se analiza la energía simulada por el modelo. Es importante seleccionar los ramales necesarios, como es el caso de los embalses locales de Dutasay y Tuñi, los cuales permiten la generación de hidroelectricidad.

Como se observa en la siguiente Figura, WEAP permite considerar algunas variables relacionadas a la GHE, como algunas referentes a la Cobertura de la Generación y el Desbordamiento de embalses.

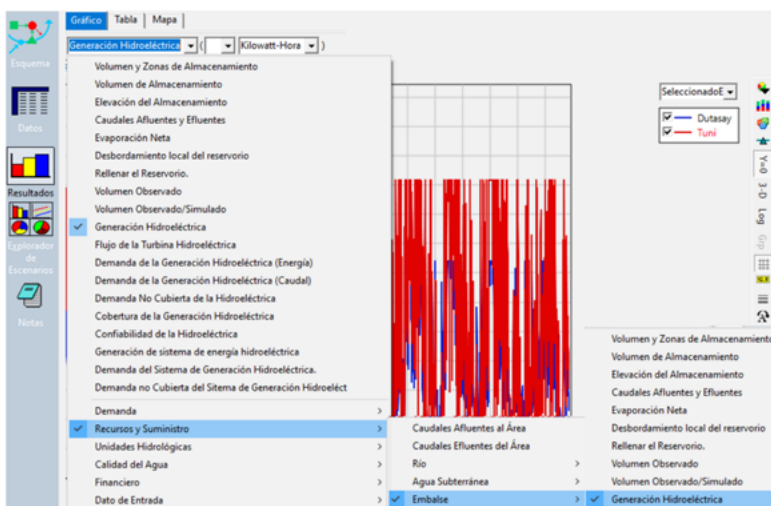


Figura 55. Obtención de resultados de la generación hidroeléctrica.

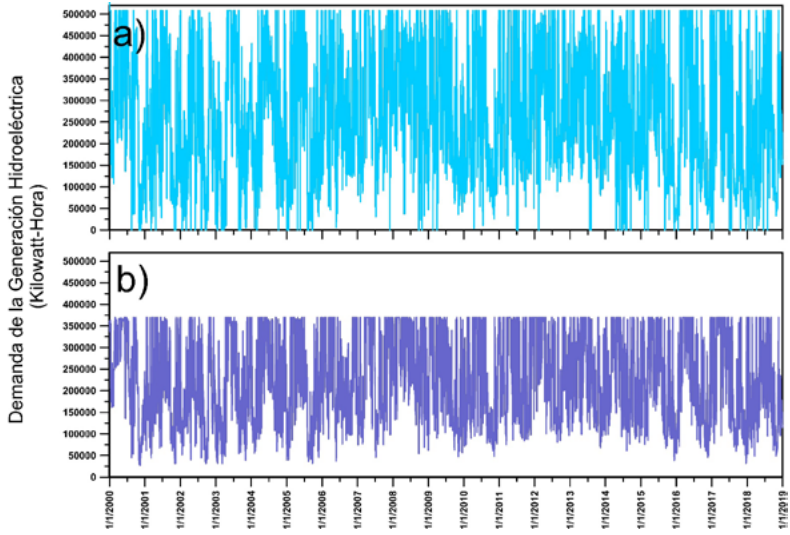


Figura 56. Demandas de energía hidroeléctrica.

Referencias

- Allen, R., Pereira, L., Raes, D., y Smith, M. (2006). *Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. <http://www.fao.org/docrep/009/x0490s/x0490s00.htm>
- Angarita, M. (2016). *Tutorial WEAP_EjemploHidrologiaEstrella*. https://www.dropbox.com/sh/by1bgenjbpu4032/AAAOhtezq_U3X48pxLSq_hoa?dl=0
- Buytaert, W., Wyseure, G., De Bièvre B., y Deckers, J. (2005). “The effect of land-use changes on the hydrological behaviour of Histic Andosols in south Ecuador”. *Hydrological Processes*, 19(20), 3985–3997.
- Cabrera, J. (2017). *Calibración de Modelos Hidrológicos*. <http://repositorio.upct.es/bitstream/handle/10317/5203/pog.pdf?sequence=1>
- Carrillo-Rojas, G., Silva, B., Rollenbeck, R., Céleri, R., y Bendix, J. (2019). “The breathing of the Andean highlands: Net ecosystem exchange and evapotranspiration over the páramo of southern Ecuador”. *Agricultural and Forest Meteorology*, 265, 30–47.
- CCGUCC, SEI. (2009). *Guía Metodológica – Modelación Hidrológica y de Recursos Hídricos con el Modelo WEAP*. https://www.weap21.org/downloads/Guia_modelacion_WEAP_Espanol.pdf
- Córdova, M., Carrillo-Rojas, G., Crespo, P., Wilcox, B., y Céleri, R. (2015). “Evaluation of the Penman-Monteith (FAO 56 PM) Method for Calculating Reference Evapotranspiration Using Limited Data”. *Mountain Research and Development*, 35(3), 230.
- ELECAUSTRO. (2015). *PLAN DE MANEJO DE LA SUBCUENCA DEL RÍO MACHÁNGARA*. https://www.elecaustro.gob.ec/index.php?option=com_content&view=article&id=156&Itemid=153
- ETAPA EP. (2019). *Agua potable*. <https://www.etapa.net.ec/Principal/Agua-potable>
- Flores, A., y Galán, L. (2019). *Desarrollo de índices de vulnerabilidad de los usuarios del agua de la subcuenca del río Machángara, afectados por el cambio climático* [Tesis de pregrado]. Universidad de Cuenca. <http://dspace>.

ucuenca.edu.ec/handle/123456789/33074

- H&G Engineering. (2017). *Curso virtual: "Modelación hídrológica y de planificación de los recursos hídricos con el modelo WEAP"*. <https://hyengineering.milaulas.com>
- Kouchi, D.H., Esmaili, K., Faridhosseini, A., Sanaeinejad, S.H., Khalili, D., y Abbaspour, K.C. (2017). "Sensitivity of Calibrated Parameters and Water Resource Estimates on Different Objective Functions and Optimization Algorithms". *Water*, 9(6), 384.
- Nabaprabhat, P., y Elango, L. (2018). "Predicting future water supply-demand gap with a new reservoir, desalination plant and waste water reuse by water evaluation and planning model for Chennai megacity, India". *Groundwater for Sustainable Development*, 7, 8–19.
- Ramón-Reinozo, M., Ballari, D., Cabrera, J.J. et al. (2019). "Altitudinal and temporal evapotranspiration dynamics via remote sensing and vegetation index-based modelling over a scarce-monitored, high-altitudinal Andean páramo ecosystem of Southern Ecuador". *Environ Earth Sci*, 78, 340. <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8337-6>
- República del Ecuador. (2014). *Ley orgánica de recursos hídricos, usos y aprovechamiento del agua*. <http://www.regulacionagua.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2016/03/Ley-Org%C3%A1nica-de-Recursos-H%C3%ADricos-Usos-y-Aprovechamiento-del-Agua.pdf>
- SEI. (2009). *WEAP (Water Evaluation And Planning)*. <https://www.weap21.org>
- SEI. (2015). *WEAP Tutorial* | Una colección de modelos independientes para enseñar el software WEAP.

UCUENCA
CIENCIAS QUÍMICAS

ISBN: 978-9978-14-535-7

