



## **SIMULACIÓN HIDROLÓGICA DE CUENCAS APLICANDO EL MODELO HIDROLÓGICO SWAT**

**Lic. Víctor Jaime Vargas Caba**  
**TÉCNICO SUPERIOR EN TOPOGRAFÍA**  
**LICENCIADO Y DOCENTE CARRERA EN GEODESIA Y TOPOGRAFÍA**

### **INTRODUCCIÓN**

Los recursos hídricos son los más sensibles ante los efectos del Cambio Climático, por lo que la valoración de su estado resulta indispensable para el bienestar de la población. Con el propósito de generar información cuantitativa sobre la dinámica del escurrimiento superficial para orientar la priorización de gestión integral en las cuencas con déficit hídrico.

Los modelos hidrodinámicos permiten contar con indicadores cuantitativos para evaluar el efecto ecológico y económico que tendrán distintas condiciones de manejo sobre los acuíferos antes de ser llevadas a la práctica. Sin embargo, para no considerar la recarga superficial como un valor global, es necesario ligar estos modelos con otro hidrológico que permita generar los datos de recarga, respondiendo a una distribución espacial más apegada a la realidad. La integración del modelo hidrológico SWAT y el hidrodinámico MODFLOW es una alternativa a esta necesidad.

### **ANTECEDENTES**

El aprovechamiento y la buena gestión del agua deben apoyarse en la participación de los usuarios y de la sociedad al nivel de las cuencas hidrográficas, el agua tiene un valor económico, social y ambiental en todos los usos a los que se destina y por tanto, su análisis, administración, planificación y en general la gestión integrada de este recurso debe contemplar las relaciones existentes entre economía, sociedad y medio ambiente, en el marco geográfico de las cuencas que son los espacios físicos en donde se verifica el ciclo hidrológico. Estos principios ilustran la importancia del agua en el mundo actual.

Bolivia no es la excepción. Por sus climas y por sus características geográficas, económicas, sociales y demográficas, enfrenta problemas y retos de gran dimensión y complejidad para satisfacer sus necesidades hídricas y desarrollar sus potencialidades.

Estos retos son mayores y más complejos, cuando se analizan a la luz de las tendencias que se perfilan para el futuro en los procesos de crecimiento demográfico, distribución de la población rural y urbana y de la economía por regiones y cuencas hidrográficas. Por ello, en los próximos años existe la necesidad de realizar esfuerzos mayores y cambios de diverso tipo en las instituciones y organizaciones públicas y privadas, así como en las actitudes y comportamientos de la sociedad para asegurar la preservación y sustentabilidad de su fuente primordial de vida el Agua.

### **EL MODELO SWAT**

El modelo SWAT (Soil Water Assessment Tool) es una herramienta desarrollada por el Dr. Jeff Arnold del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos con el apoyo de La Universidad de Texas de 1980 a 1987. El propósito del modelo es predecir el impacto que originan las prácticas del manejo del suelo en el recurso agua y en la generación de sedimentos dentro de una cuenca hidrográfica.

Es decir el Modelo nos permite predecir el transporte de sedimentos, con el manejo de suelo en la agricultura, como en los usos de suelo y de químicos, en cuencas donde no se cuenta con infraestructura de aforos.

En Bolivia la calidad del agua es esencial, para el abastecimiento de las comunidades. El impacto del cambio climático es continuo y los modelos hidrológicos numéricos nos ayudan en forma importante a predecir, los escurrimientos hidrológicos.

El modelo es una herramienta para predecir el comportamiento de las cuencas hidrológicas y nos llevan a resultados confiables, en periodos de tiempo cortos y rápidamente, así como, a determinar las mejores condiciones de manejo de este recurso vital.

## APLICABILIDAD DE MODELOS

La aplicabilidad de modelos matemáticos de simulación hidrológica de cuencas, como el caso del modelo SWAT, en los países menos desarrollados ha encontrado dos barreras: la escasez de datos y la desconfianza en modelos desarrollados en otras latitudes, modelos como SWAT requieren un elevado volumen de datos de entrada; sin embargo como los requerimientos de información para el empleo de SWAT puede ser satisfechos con dificultades sorteables.

La falta de datos para el ingreso al modelo SWAT, en países sub desarrollados como el nuestro, se busca mecanismos para lograr cubrir las necesidades del presente modelo, como el caso del modelo de digital de elevación DEM, que se obtiene de una página de la NASA dato esencial que se constituye la base para iniciar éste estudio.

Sin embargo este tipo de información se lograría obtener de la página de GeOBOLIVIA, pero la calidad de la misma no cubre las expectativas para un análisis adecuado, es de esta manera se recurre a modelos DEM de alta resolución que nos permita obtener información lo más cercano a la verdad.

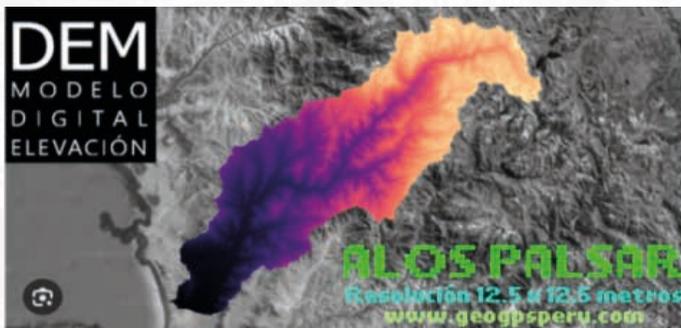
## MODELOS ALOS PALSAR

Modelos Digitales de Elevación de alta resolución a partir de información SAR. Siendo una fuente poco conocida, es uno de los recursos DEM más atractivos con una resolución nativa de 30 y 12,5 metros remuestreados, en el tamaño del pixel a nivel mundial y de manera multitemporal, con una periodicidad de 46 días aunque un periodo de mapeo histórico comprendido entre 2006 y 2011 o mosaicos anuales a 25 metros hasta la actualidad, como se ve en la Figura 1.

Información de alta precisión nos permite lograr un análisis preciso en la modelación hidrológico como base fundamental e importante de simulaciones, con el modelo SWAT.

Forma parte como pilar fundamental para el modelo los datos meteorológicos e hidrométricos de las diferentes cuencas que sean sujeto de estudio, pero sin embargo la escasa información de las estaciones meteorológicas que son parte del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) institución técnico científica descentralizada del Ministerio de Medio Ambiente y Agua, que si bien otorga información del comportamiento hidro-climática de manera general en Bolivia, no proporciona datos precisos en una gran parte del país situación que limita a obtener información precisa, para cualquier estudio hidrológico de cuencas generando un descuido en el manejo integral de cuencas (MIC).

Figura 1  
Modelo Alos Palsar



Fuente: <https://www.google.com/search?client=2023>

El ingreso de datos del tipo de suelo y uso de del suelo es muy importante para el modelo ya que los mismos, pueden ser clasificados de acuerdo asu uso, composición y textura, estos datos se clasifican de la FAO-UNESCO.

## APLICACIÓN DEL MODELO SWAT

Este modelo simulación hídrica, tiene la posibilidad de reproducir todos los componentes del ciclo hidrológico mediante un sistema de información geográfica.

El modelo SWAT está basado físicamente en:

*Datos de entrada disponibles de precipitación, temperatura máxima y mínima radiación solar, velocidad del viento, humedad relativa, suelos, etc. Información compuesta por más de cinco variables permitiendo calcular la evapotranspiración potencial del modelo utilizando la fórmula de Penman Monteith.*

$$\text{Penman Monteith } \epsilon_{T_0} = \frac{0.408 \cdot \Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T - 273} \cdot u_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)}$$

Es computacionalmente eficiente para operar en grandes cuencas en tiempo razonable.

Es de tiempo continuo y capaz de simular grandes periodos para calcular los efectos de los cambios bajo diferentes escenarios.

*El modelo hidrológico está basado en la ecuación general de balance hídrico:*

$$SW_t = SW + \sum_{i=1}^t (R_i - Q_i - ET_i - P_i - QR_i)$$

## DATOS DE ENTRADA PARA EL MODELO

1) Modelos DEM Alos Palsar, información que se obtiene de la página de la NASA, a través de vectores que delimita la zona de ubicación proporcionada por Google Hearth en formato Klm, Kmz, permitiendo adquirir el DEM del área de interés, como se puede ver en la Figura 2.

ALOS PALSAR

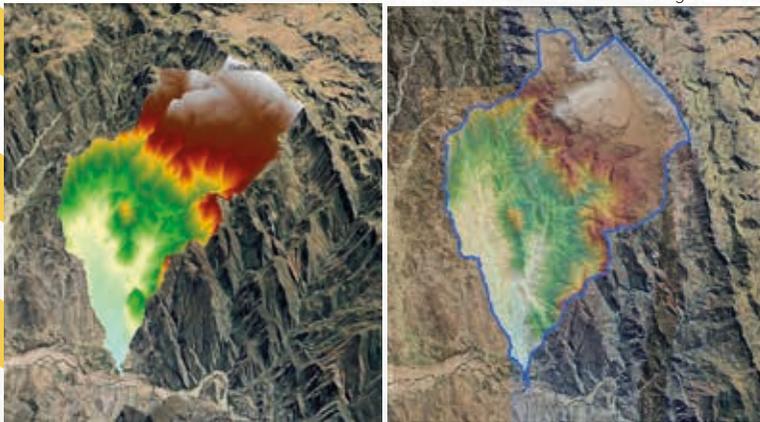


Figura 2  
Modelo DEM Alos Palsar en 3D sobre Google Hearth.

Fuente: elaboración propia

- Datos de Evapotranspiración ET<sub>r</sub>
- Datos Humedad Relativa
- Datos Precipitación
- Datos de Temperatura
- Datos Velocidad del Viento

2) Datos Hidro – Meteorológico de SENAHHMI

Datos crudos que en una primera instancia son revisadas, mismas que nos permiten hacer los ajustes necesarias de los datos faltantes, por diferentes métodos, ya sean por el método del promedio aritmético, método de la proporción normal, método de la interpolación o ecuación lineal, obteniendo datos completos del periodo de análisis en el formato del modelo SWAT.

3) Datos de Uso y tipo de Suelos

Toda la información, se baja de la FAO en formato raster y luego se va cortando en el software compatible con el SWAT, Arc-Map, QGIS, etc. paso a paso hasta llegar a la zona de interés.

Una vez obtenido toda la información necesaria para el ingreso de datos al modelo, cargamos al software en este caso al QSWAT. Originando un generador climático que puede simular las temperaturas y las lluvias diarias de la simulación hidrológica de la cuenca en estudio, para un periodo determinado como se ve en la figura 3.

Figura 3  
Proceso de datos hidrológicos en el QSWAT



Fuente: elaboración propia

Una vez cargada toda la información se obtiene las unidades de respuesta hidrológica (HRU), que nos permite analizar el comportamiento hidrológico de la cuenca en estudio, permitiéndonos obtener una simulación hídrica, a través de informes de resultados en gráficos, tablas, donde se muestran resultados de la

escorrentía superficial, sub superficial, y la percolación del agua a los acuíferos, como también el arrastre de los sedimentos de la cuenca en estudio, a través de informes diarios mensuales, anuales, de acuerdo a un periodo de retorno por determinar.

Resultados en gráficos que se espera de la simulación hidrológica del modelo SWAT, como se ve en la figura 4.

**Escorrentía en milímetros / mes, modelación con mapas globales suelos y uso QSWA**

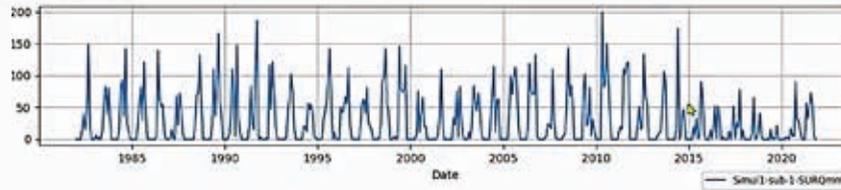
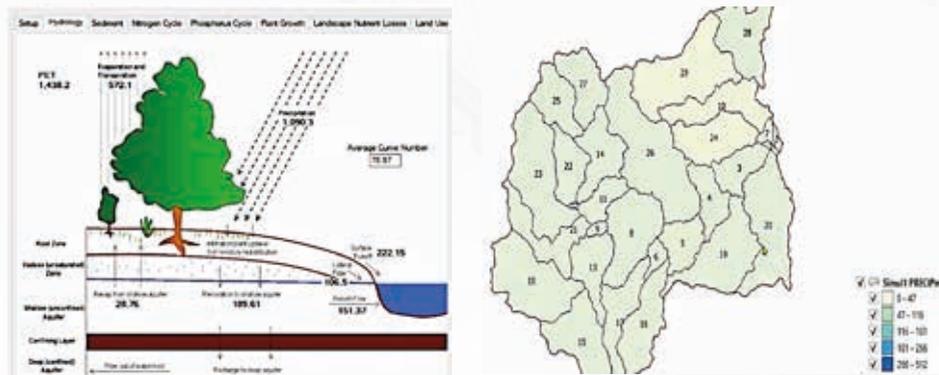


Figura 4  
Resultado en gráficos de la simulación hidrológica



Fuente: Elaboración propia

**AJUSTE DE LOS PARÁMETROS MÁS SENSIBLES DEL MODELO**

Observando las sugerencias hechas en el manual del usuario del SWAT, los parámetros más sensibles que afectan significativamente los valores del modelo para el resultado de agua.

Figura 5  
Parámetros más sensibles del modelo hidrológico SWAT

Parámetro a modificar	Significado	Archivo de entrada
CN2	Curva numérica	.mgt
SOL_AWC	Capacidad de agua disponible en el suelo	.sol
ESCO	Factor de compensación de la evaporación en el suelo	.hru
GW_REVAP	Coefficiente de agua subterránea	.gw
GWQMN	Profundidad del umbral de agua en el acuífero superficial	.gw

Fuente: Elaboración propia

**COMPARACIÓN DE RESULTADOS CON DATOS ESTADÍSTICOS**

Para conocer la eficiencia en los resultados arrojados por el modelo SWAT, se realiza el análisis con la bondad de ajuste entre los valores medidos y simulados a través de la determinación del coeficiente de eficiencia Nash-Sutcliffe, este Indicador de Eficiencia NSE (por sus siglas en inglés, Nash-Sutcliffe Efficiency), se puede calcular con la siguientes expresión:

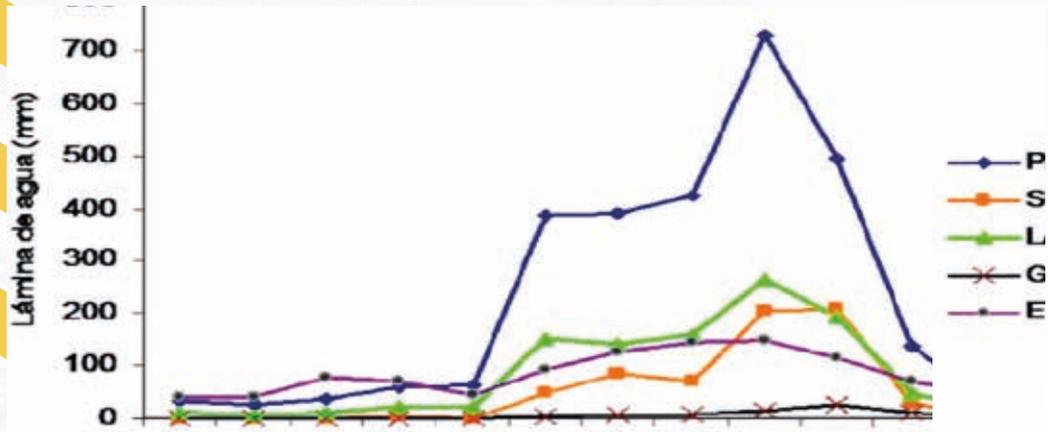
$$NSE = 1 - \frac{\sum_{j=1}^n (O_j - S_j)^2}{\sum_{j=1}^n (O_j - \bar{O}_j)^2}$$

Dónde:  
 Y ó S<sub>j</sub> = valor simulado  
 X u O<sub>j</sub> = valor observado o medido  
 X<sub>m</sub> u O<sub>j</sub> = valor promedio de los valores observados

## APLICACIÓN DE PRUEBAS ESTADÍSTICOS

Se realiza la aplicación de pruebas estadísticas con el coeficiente nash sutcliffe, varianza, coeficiente de variación y el error medio absoluto.

### GRÁFICO BALANCE HÍDRICO DE LA CUENCA



En esta gráfica, se observa que durante los meses de mayo a noviembre, la evapotranspiración actual se presenta en mayor escala, debido al desarrollo vegetativo de los cultivos, mientras que en la época de sequía (junio a agosto), la evapotranspiración excede a la precipitación, y se asume que se debe a una mayor evaporación de agua contenida en el suelo.

### RESUMEN DE LAS VARIABLES SIMULADAS POR EL MODELO SWAT

AÑO	PREC (mm)	SURQ (mm)	LATQ (mm)	GWQ (mm)	ET (mm)
.....	1002.96	228.73	390.53	33.9	325.38
.....	1122.22	339.81	396.18	32.1	354.53
.....	695.79	93.81	264.06	12.3	337.44
<b>TOTAL</b>	<b>2820.97</b>	<b>662.35</b>	<b>1050.8</b>	<b>78.3</b>	<b>1017.35</b>

*Significado de las literales*

*PREC.- Precipitación (mm).*

*SURQ.- Escorrentía superficial (mm).*

*LATQ.- Escorrentía lateral ó subsuperficial (mm).*

*GWQ.- Descarga de agua subterránea (mm).*

*ET.- Evapotranspiración actual (mm).*

*Debido a que la producción de agua considera únicamente las variables SURQ,LATQ y GWQ, según la ecuación no se contempló la percolación en este resumen.*

## CONCLUSIONES

En el presente artículo se hace conocer el modelo SWAT y su capacidad de análisis a partir de datos hidroclimáticos que simulan un generador climático, y al mismo tiempo entender cuál la importancia de este método para la adquisición de información del comportamiento hidrológico de las cuencas a través de una simulación, mismas que apoyaran para proyectos y programas en G.I.R.H. – M.I.C, que es muy importante para la sobre vivencia de los recursos naturales.

De igual forma los resultados obtenidos en gráficos y tablas, nos permite entender un comportamiento hidrológico de una cuenca en estudio, durante un periodo de retorno que uno desee determinar y analizar correctamente a través de una lectura en la interpretación de todos los datos realizados para la simulación hidrológica.

Se logra resultados importantes del comportamiento hidrológicos de la cuenca a través de información valiosa que arroja el modelo SWAT, comparadas con datos estadísticos y simulados, mismas que coadyuvan en el cálculo de caudales de escurrimiento y el comportamiento de una cuenca a través resultados realmente expectables, datos que son verificados y validados de acuerdo al Coeficiente de Determinación, Nash Sutcliffe.

## BIBLIOGRAFÍA

Acevedo, A. D. (2005). Estudio de Respuesta Hidrodinamica simulada el Acuífero del Valle de Cambay. Agrocienza, 247-258.

Bermudez, O. Z. (2010). Aplicabilidad del Modelo Hidrologico SWAT en Cuencas con Características Extremas. 568.

Mariann José Espinoza Acuña, C. R. (2022). Aplicación del Modelo Hidrologico SWAT en Unidades Hidrográficas de Nicaragua. 24-29.

Van Liew, M. W. (2005). Problems and Potential of autocalibrating a hydrologic model. Transactions of the ASAE. American Society of Agricultural Ebgneers ISSN 0001-2351.Vol.48(3):1025-1040. American Society of Agricultural Ebgneers ISSN 0001-2351.Vol.48(3):1025-1040.