

ANALISIS DEL BALANCE HÍDRICO BASADO EN SIG PROYECTO CUENCA HUARMEY

M.Sc Montoya Saul, M.Sc Dufour Robin, B.Sc Barzola Katty

Ground Water International, Trípoli 315 – Miraflores - Lima 18 – Perú

INTRODUCCIÓN

La siguiente investigación trata acerca del análisis del balance hídrico en una cuenca utilizando Sistemas de Información Geográfica (SIG). El análisis es distribuido sobre una cierta cuenca y simula todos los componentes del ciclo hidrológico en base a mediciones promedio. La metodología descrita a continuación emplea los principales factores para determinar el balance hídrico como son la cobertura de la tierra, la textura de suelo, la topografía y los parámetros meteorológicos.

Los modelos hidrológicos antiguos no utilizan suficientes datos adecuados y realizan pocos cálculos analíticos. Los métodos antiguos no proveen la recarga específicamente como un resultado y el valor estimado es un promedio aplicable para toda la cuenca. Actualmente existen nuevas bases de datos y formulas más complejas para mejorar el análisis de los parámetros hidrológicos con la capacidad de calibrar los parámetros de entrada en base a mediciones de campo.

Esta metodología es adecuada para las cuencas andinas y trabaja bien con pocos datos. La metodología trabaja con mapas geológicos, imágenes satelitales (Lansat 742) y topografía regional, los cuales se encuentran disponibles para la mayoría de regiones del Perú. Esta metodología puede ser constantemente mejorada, al obtener mayores mediciones de campo y observaciones meteorológicas durante la vida del proyecto. Debido a su simplicidad, el modelo puede proveer un cálculo rápido en caso haya un cambio en los parámetros de entrada o en el uso de tierras, reduciendo el tiempo de procesamiento en la etapa de calibración y simulación. El modelo funciona con ArcMap 9.2.

El área de estudio yace en la cuenca Huarmey – Ancash – Perú. Las elevaciones de la cuenca seleccionada se encuentran entre los 50 msnm y 4950 msnm con un punto de descarga ubicada con las siguientes coordenadas 160719 Este, 8886142 Oeste (WGS 18S). Esta cuenca está cubierta mayormente por suelos aluviales, rocas, morrenas y depósitos eólicos en la parte inferior cercana al litoral.

CONCEPTUALIZACIÓN DEL MODELO

La configuración geológica y la geomorfológica para el área de estudio se resumieron en seis tipos de principales suelo-roca que son factores claves en el análisis.

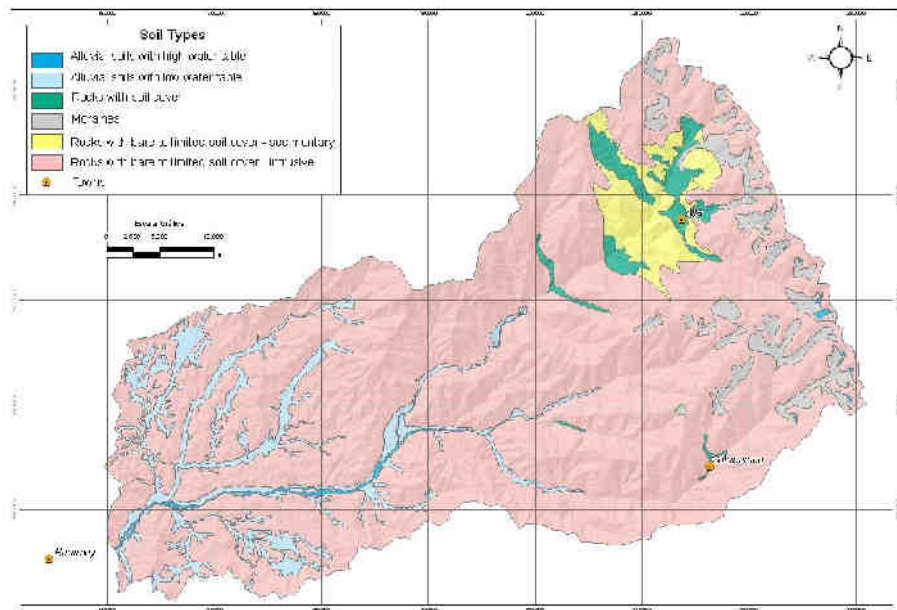


Fig. 1 Soil Map

1. Suelos aluviales con alto nivel freático
2. Suelos aluviales con bajo nivel freático
3. Rocas con cobertura de suelo
4. Morrenas
5. Rocas sin o con limitada cobertura de suelo - sedimentaria
6. Rocas sin o con limitada cobertura de suelo - intrusiva

El modelo trabaja con la ecuación del balance hídrico en una discretización mensual:

$$P = E_{tc} + S + R$$

Donde:

- P = Precipitación (mm/mes)
- Etc= Evapotranspiración Real (mm/mes)
- S = Escorrentía Real (mm/mes)
- R = Recarga (mm/mes)

Los parámetros de entrada utilizados para este modelo hidrológico se tomaron de bases de datos, estaciones meteorológicas, mediciones de campo y de la extrapolación de datos de cuencas aledañas. Los cuatro componentes antes mencionados tienen sus propios cálculos; una breve explicación de ellos se encuentra a continuación.

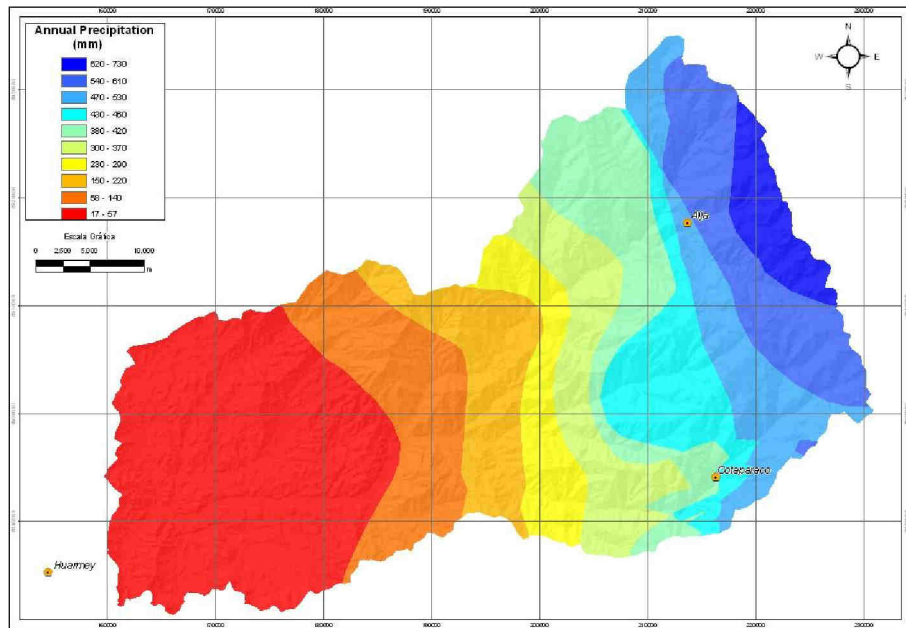


Fig. 2 Mapa de Precipitación Anual

PRECIPITACIÓN - P

El mapa de precipitación se obtiene del SENAMHI en base a mediciones promedio de estaciones en el área de estudio. Se obtuvo una distribución espacial de la precipitación mediante la interpolación de datos con altos valores en las montañas y baja precipitación o cero precipitaciones en la costa.

Tabla 1- Precipitación Media Mensual en la Cuenca Huarney

MES	PRECIPITACION MEDIA (mm)
ENE	41.1
FEB	61.67
MAR	75.87
ABR	24.35
MAY	4.86
JUN	1
JUL	1
AGO	1.6
SET	7.16
OCT	18.84
NOV	11.24
DIC	22.37

EVAPOTRANSPIRACIÓN REAL - ETC

La potencial Evapotranspiración (Eto) para un césped referencial en la cuenca Huarney se calculó utilizando el Software LocClim desarrollado por La Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y La Alimentación (FAO) [Allen, 1998]. Por

definición, el césped referencial es similar en tamaño a la vegetación encontrada en los andes superiores en temporada de lluvias.

Las zonas aluviales con un alto nivel freático se definieron como áreas de descarga de agua subterránea (ver parte 4) donde el alto nivel de agua subterránea satisface la demanda de agua del césped en temporada de lluvias.

Sin embargo, el 84% de la potencial evapotranspiración (Eto) fue tomada como potencial evapotranspiración ajustada (AEto) para suelos aluviales debido a las pistas, edificaciones, trochas no reconocibles en la resolución de la imagen satelital que pueden resultar en zonas de menor evaporación. El alto nivel freático permite la evapotranspiración de la vegetación en zonas aluviales en temporada seca, convirtiéndose zonas de recarga negativa.

Para las rocas con cobertura de suelo y rocas con cobertura limitada de suelo, la potencial evapotranspiración ajustada (AEto) en temporada de lluvias es el 70% y 60% (como máximo) respectivamente del valor del Eto porque presentan menos cobertura vegetativa, (Ver Tabla 2). La Evapotranspiración para rocas con/sin cobertura de suelo es limitada por la precipitación, especialmente en la temporada de lluvias donde toda el agua precipitada se evapora.

La evapotranspiración actual (Etc) es ajustada de la evapotranspiración potencial ajustada (AEto) considerando las condiciones de cultivo determinadas por la profundidad del nivel freático, precipitación, espesor de la capa superior del suelo y de la pendiente superficial. La evapotranspiración actual es asimismo un parámetro de calibración de esta metodología donde procedimientos de ensayo y error deben realizarse para que el balance hídrico coincida con los valores medidos de la descarga de la cuenca (Ver parte 4).

Parámetros	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Tmax	13.8	13.2	13.6	14.2	14.4	14.5	15.1	15.1	14.9	14.3	14.1	14.1
Tmin	2.4	3.0	2.9	2.0	-0.4	-3.0	-3.9	-3.2	-1.4	0.0	0.6	0.6
Evapotranspiración Potencial (Eto)												
Eto (mm/mes) - del LocClim	86.5	71.9	85.8	72.7	61.6	43.4	45.1	58.6	79.6	93.8	84.2	88.8
Adjusted Potential Evapotranspiration (AEto)												
1. Suelos aluviales con alto nivel freático (mm)	54	61	66	36	28	25	25	28	32	38	38	40
2. Suelos aluviales con bajo nivel freático (mm)	47	51	55	33	25	21	21	24	27	33	33	35
3. Rocas con cobertura de suelo (mm)	47	51	55	33	25	21	21	24	27	33	33	35
4. Morrenas (mm)	47	51	55	33	25	21	21	24	27	33	33	35
5. Rocas sin o con limitada cobertura de suelo - sedimentaria (mm)	43	47	51	30	23	20	20	22	23	30	30	32
6. Rocas sin o con limitada cobertura de suelo - intrusiva (mm)	43	47	51	30	23	20	20	22	23	30	30	32

Tabla 2 – Evapotranspiración Potencial, Ajustada y Actual

ESCORRENTÍA REAL - S

La escorrentía se calculó mediante una versión mejorada del Método de número de curva (CN) realizada por el Servicio de Conservación del suelo de Estados Unidos. [USDA-NRCS,,1972]. El método CN permite cambios estacionales de acuerdo a la condición de humedad, esta metodología solo funciona en condiciones de humedad media para la época de lluvias, mientras que en época seca la escorrentía es nula a despreciable.

Las fórmulas para la potencial escorrentía son:

$$S_o = \frac{(P - P_o)^2}{P + 4P_o} \quad \text{cuando } P > P_o$$

$$S_o = 0 \quad \text{cuando } P < P_o$$

donde:

P = Precipitación (mm)

Po = Umbral de escorrentía (mm)

S_o = Escorrentía potencial (mm)

Los valores de la escorrentía potencial son limitados por la precipitación y la evapotranspiración real. La escorrentía real – S se calcula mediante estas fórmulas:

$$S = S_o \quad \text{donde } S_o < P - E_{tc}$$

$$S = P - E_{tc} \quad \text{cuando } S_o > P - E_{tc}$$

Los valores de P_o se basaron en los valores característicos derivados del método CN [USDA-NRCS,1972] y determinados para el suelo específico y configuración de la pendiente. Se asume que toda la escorrentía potencial en las áreas de descarga de agua subterránea contribuye con la escorrentía superficial mientras que en las áreas de infiltración solo tormentas de gran intensidad generarán escorrentía superficial [Batelaan, 2007].

Los valores de P_o para la cuenca del Río Huarmey utilizados en el modelo fueron:

Valores de P_o - Condiciones medias de humedad					
Cobertura de Suelo	0°-5°	5°-10°	10°-20°	20°-40°	>40°
1. Suelos aluviales con alto nivel freático (mm)	0	0	0	0	0
2. Suelos aluviales con bajo nivel freático (mm)	28	24	21	18	16
3. Rocas con cobertura de suelo (mm)	28	24	21	18	16
4. Morrenas (mm)	7	7	5	4	4
5. Rocas sin o con limitada cobertura de suelo - sedimentaria (mm)	22	18	15	12	10
6. Rocas sin o con limitada cobertura de suelo - intrusiva (mm)	22	18	15	12	10

Table 3 – Valores de P_o para diferentes tipos de suelo

RECARGA - R

La recarga se define como la porción de precipitación que ingresa en la zona saturada [Batelaan, 2007]. La recarga en esta metodología se determina como el residuo del balance hídrico. Una vez que la evapotranspiración real toma su porción de precipitación, luego la escorrentía real toma otra porción. Finalmente la parte restante de precipitación se transforma en recarga.

DISCRETIZACIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL

El modelo hidrológico trabaja con un patrón regular de celdas raster, realizando cálculos en cada celda raster durante un cierto periodo, por lo tanto es importante tener una discretización espacial y temporal apropiada para obtener resultados del modelo consistentes con el balance hídrico real.

El análisis espacial para la cuenca del Río Huarmey se basa en el análisis espacial con una resolución determinada por la calidad de los datos de ingresos. Se pretende utilizar una resolución lo suficientemente fina para simular toda la conceptualización del modelo a través de un espacio coherente y representativo. La resolución espacial discreta debe ser suficientemente gruesa para ser analizada con los recursos informáticos disponibles.

La discretización temporal mensual y los valores de precipitación promedios permiten que la escorrentía superficial provocada por una precipitación ocurra el mismo mes que ha sido precipitada, por lo tanto no existen descargas superficiales restantes en el siguiente periodo de tiempo.

ANÁLISIS DE DATOS

Se ha creado un modelo para el análisis hidrológico que integra un balance hídrico en SIG. El modelo trabaja en un estado casi uniforme [Batelaan, 2007] en cuencas con un alto rango de características geológicas, climáticas, topográficas e hidrogeológicas.

El esquema hidrológico que regula la recarga-escorrentía-evapotranspiración-precipitación se basa en algunas suposiciones que se corroborarán con los resultados y la interacción con los modelos de agua subterránea. Algunas de estas suposiciones han sido mencionadas en el componente del balance hídrico respectivo, a continuación un resumen de ellas.

- Los valles aluviales y las morrenas son zonas de recarga negativa en el sistema hídrico debido su alto nivel freático. Incluso son zonas de descarga negativa en la época seca.
- La recarga es determinada como el residual del balance hídrico, luego de ocurrir la evapotranspiración real y la escorrentía real. .

- La Evapotranspiración Potencial Ajustada (AEto) como Evapotranspiración Real (Eto) tendrá lugar en Febrero y Marzo debido a la vegetación de alta densidad que existe en dichos meses cubriendo la mayor parte de la superficie. El resto del año, la Evapotranspiración Real es calibrada para tener un balance hídrico que concuerde con las descargas de escorrentía medidas.
- En la época seca, cuando la precipitación mensual es menor de 10 - 15mm, toda el agua de las precipitaciones se evapora y no se presentan escorrentías ni recargas

Al aplicar estas suposiciones como condicionales, el balance hídrico se calcula utilizando la fórmula mencionada en la parte 2.

$$P = Etc + S + R$$

Los procedimientos de prueba y ensayo en el proceso de calibración arrojaron estos valores computados de la escorrentía superficial que son comparados con los flujos mensuales promedios de Huarmey (1985-2000) en río Huarmey (09°58'S, 77°52'W) en la Figura 5.

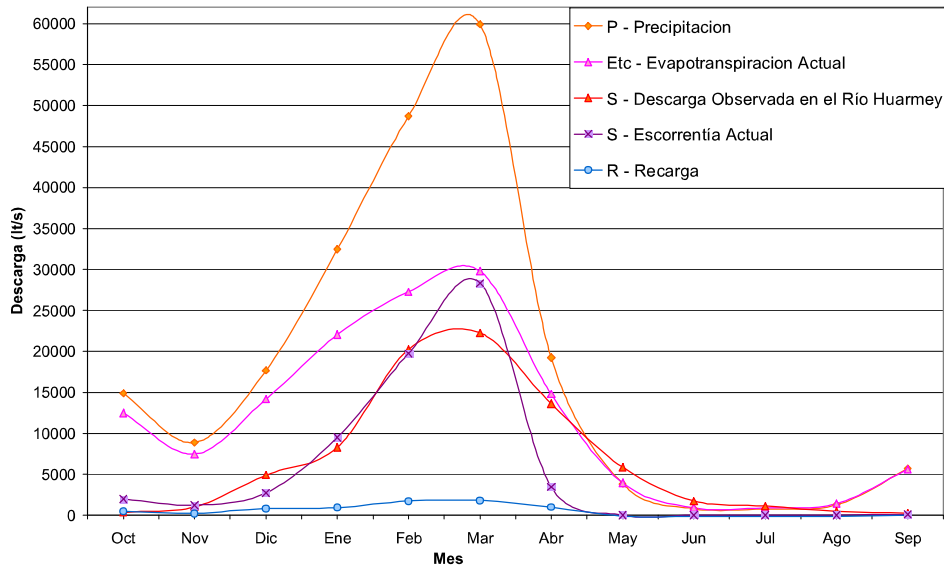


Fig. 3 Balance Hídrico en la Cuenca del Río Huarmey –Valores Calculados y Estimados

RESULTADOS DEL MODELO

Para la Cuenca Huarmey, la Evapotranspiración Real, Escorrentía Real y Recarga se muestran con sus valores acumulados para un año promedio

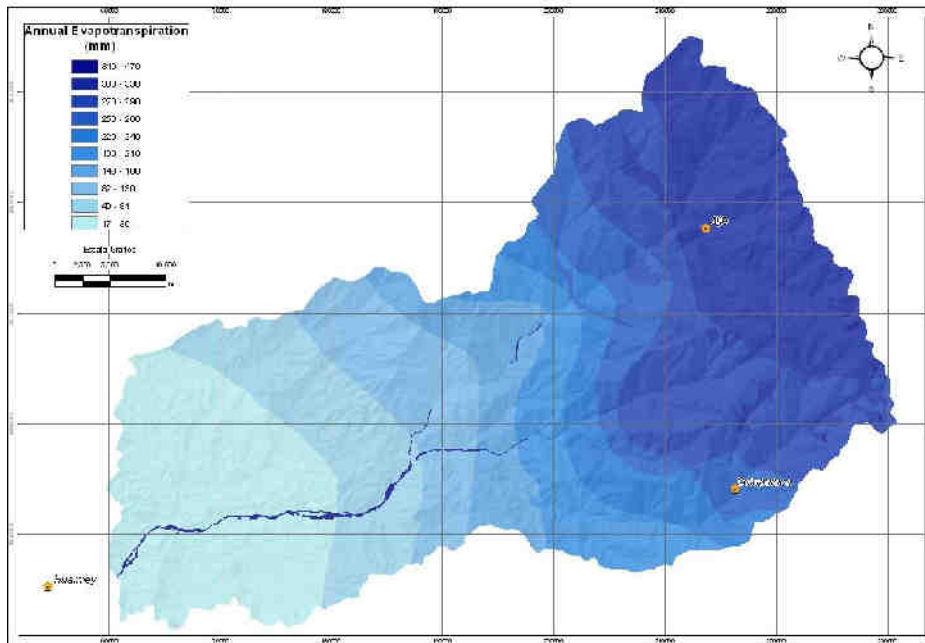


Fig. 4 Mapa de Evapotranspiración Real Anual

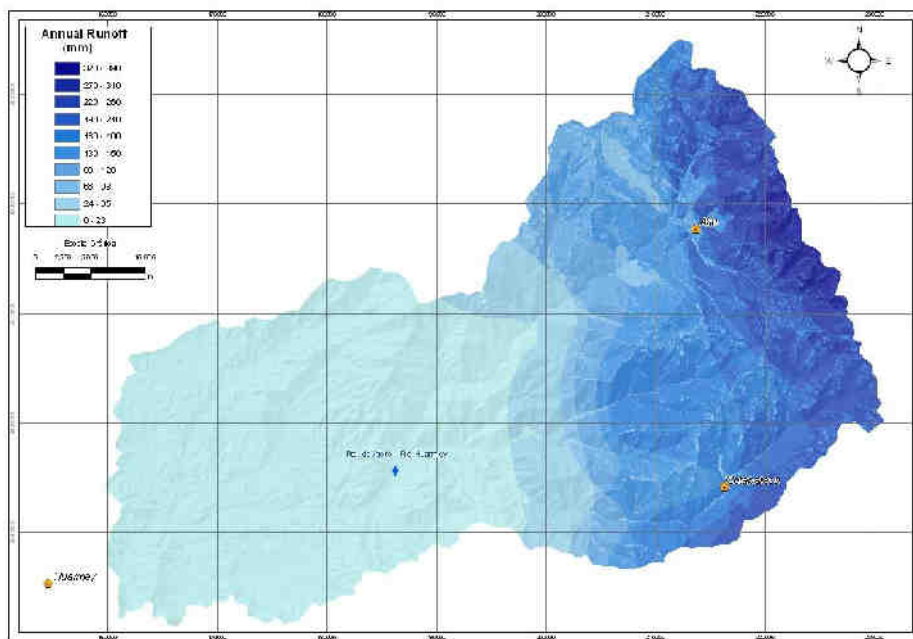


Fig. 5 Mapa de Escorrentía Real Anual

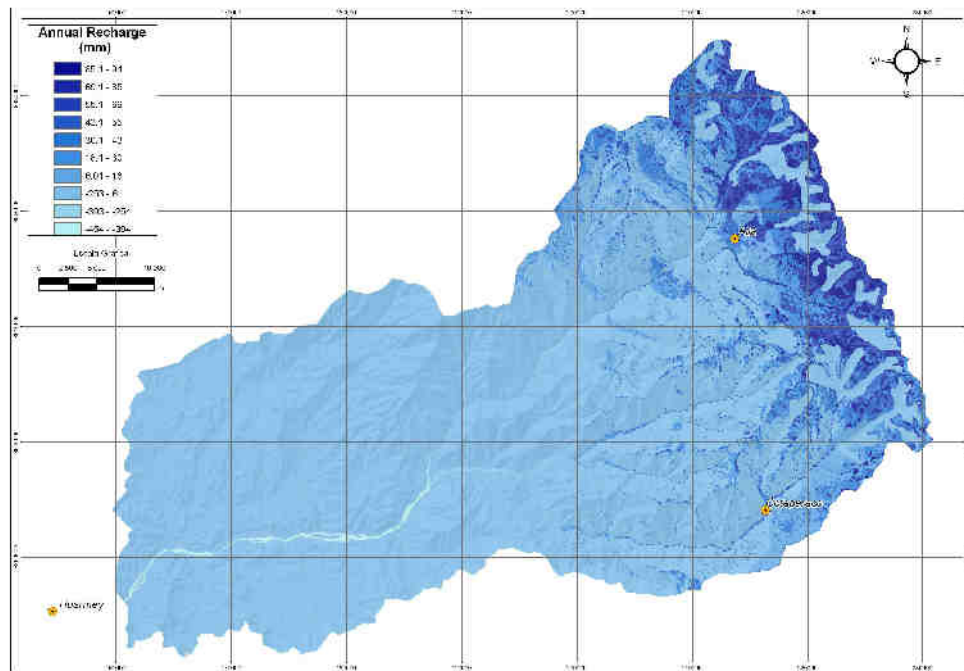


Fig. 6 Mapa de Recarga Anual

CONCLUSIONES

La recarga resultante muestra un patrón complejo donde cambios drásticos en los valores de recarga pueden ocurrir dependiendo de los parámetros de entrada. Los valores espacialmente distribuidos de recarga y descarga son ingresos consistentes y significativos para cualquier modelo numérico de flujo de agua subterránea.

El modelo presenta una recarga promediada en la cuenca de 3% del valor la precipitación anual. Es importante mencionar que este cálculo considera las zonas altas de lluvias intensas, y las zonas bajas de precipitación baja o nula y gran evapotranspiración. Esta recarga significa un ingreso constante a las aguas subterráneas de modelo de 531 lt/s.

Los datos de ingreso no fueron muy coherentes para los meses de Mayo (donde la escorrentía es mayor a la precipitación) y en Octubre (donde la precipitación es mayor que en Noviembre). Sin embargo para los meses de más recarga, los resultado del modelo son coherentes con los valores observados.

El modelo hidrogeológico puede interactuar con un modelo numérico de agua subterránea para lograr un entendimiento global del flujo de agua subterránea y superficial en una cuenca. Las suposiciones iniciales de los niveles de agua subterránea pueden mejorarse con el modelo numérico de agua subterránea y ambos pueden convergir en una única solución.

Es más importante asegurar que el balance hídrico sea espacialmente realista que optimizar a ciegas la cuenca para que coincida con las descargas medidas en la salida de la cuenca. Es necesario optar por un criterio hidrológico adecuado para analizar que los resultados sean coherentes y trabajen correctamente en el ciclo de agua.

El modelo se estima para toda la cuenca, sin embargo, el modelo puede calibrarse en pequeñas sub-cuencas dependiendo de las descargas medidas. Por otro lado, luego de la calibración, el modelo puede determinar el balance hídrico para cada sub-cuenca dentro de su extensión.

La combinación del modelo hidrológico con el hidrogeológico es una plataforma sólida para lograr un manejo sostenible de los recursos hídricos. Ambos modelos brindan un completo entendimiento del ciclo de agua y proveen simulaciones de cambio de uso de tierras y políticas de recursos hídricos.

REFERENCIAS

- Batelaan, O., De Smedt, F. 2007. GIS-based recharge estimation by coupling surface-subsurface water balances. *Journal of Hydrology*. p. 337-355.
- Allen, R., Pereira, L., Raes, D., Smith, M. 1998. Crop Evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and drainage paper 56. Ch. 2.
- USDA-NRCS. 1972. National Engineering Handbook. Vol. Hydrology Section 4.