

## Generación de caudales medios mensuales de la cuenca Grande (Mashcón) impactada por actividad minera

*Generation of monthly average flows of the Grande basin (Mashcón) impacted by mining activity*

<sup>1</sup> José Francisco Huamán Vidaurre, <sup>2</sup>Segundo Reinaldo Rodríguez Cruzado

<sup>1,2</sup> Docentes de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Cajamarca, Av. Atahualpa 1050, Cajamarca, Perú

**Recibido: 14-09-18**

**Aceptado: 10-10-18**

### Resumen

*El trabajo de investigación tuvo por objetivo estimar los caudales medios mensuales de la cuenca Grande, con altitud media de 3508.5 m, mediante el modelo hidrológico determinístico-estocástico Lutz Scholz, utilizando la precipitación media mensual (período 1968-2016), tomando como punto emisor la captación Tres Molinos ubicada en el río Grande; pero en la parte alta de la cuenca se utiliza el agua en actividades de explotación minera a tajo abierto, habiendo impactado un área de 11.0 km<sup>2</sup>, lo que ha reducido el área de drenaje de la cuenca a 60.0 km<sup>2</sup> de los 71.0 km<sup>2</sup> del área sin impactar. La precipitación pluvial, tanto para la cuenca Grande no impactada, e impactada por actividad minera es la misma para el período 1968-2016, mostrando el régimen característico de meses lluviosos y meses con escasa precipitación pluvial, siendo el mes más lluvioso marzo con 158.6 mm y el de menor pluviosidad Julio con 10.6 mm. Los caudales medios mensuales (mm/mes) generados por el modelo determinístico estocástico Lutz Scholz, varían en relación al régimen de precipitación pluvial de la cuenca Grande; tal que en los meses lluviosos varía de 71.2 mm/mes a 46.9 mm/mes y en los meses de escasez varía de 40.5 mm/mes a 28.2 mm/mes, notándose una gran diferencia entre ambos períodos. Dichos caudales incluyen la escorrentía directa y el flujo base. En función de los caudales medios mensuales generados, en mm/mes, se estimaron los volúmenes mensuales de agua aprovechable de la cuenca Grande, para persistencias relacionadas con los usos agrícola-pecuario (75%), consumo humano (80%), industrial (85%) e hidroenergía (95%), obteniéndose resultados tanto para el escenario de cuenca no impactada y escenario de cuenca impactada por actividad minera en relación con el área de drenaje.*

**Palabras clave:** *Cuenca impactada, modelo Lutz Scholz, caudales generados, agua disponible.*

### Abstract

*The objective of the research work was to estimate the average monthly flows of the Grande basin, with an average altitude of 3508.5 m, by means of the deterministic-stochastic hydrological model Lutz Scholz, using the average monthly rainfall (1968-2016 period), taking the Tres Molinos catchment located on the Rio Grande as the emitting point; but in the upper part of the basin, water is used in open-pit mining activities, having impacted an area of 11.0 km<sup>2</sup>, which has reduced the drainage area of the basin to 60.0 km<sup>2</sup> from the 71.0 km<sup>2</sup> of the area without impact. The rainfall, both for the large basin not impacted, and impacted by mining activity is the same for the period 1968-2016, showing the characteristic regime of rainy months and months with limited rainfall, being the rainiest month March with 158.6 mm and the lowest rainfall July with 10.6 mm.*

*The average monthly flows (mm / month) generated by the Lutz Scholz stochastic deterministic model vary in relation to the rainfall regime of the Grande basin; such that in the rainy months it varies from 71.2*

*mm / month to 46.9 mm / month and in the months of shortage it varies from 40.5 mm / month to 28.2 mm / month, noticing a great difference between both periods. These flows include direct runoff and base flow. Based on the monthly average flows generated, in mm / month, the monthly volumes of usable water from the Grande basin were estimated, for persistence related to agricultural-livestock uses (75%), human consumption (80%), industrial (85%) and hydropower (95%), obtaining results for both the non-impacted basin scenario and the basin impacted by mining activity in relation to the drainage area.*

**Keywords:** *Impacted basin, Lutz Scholz model, generated flows, available water.*

## Introducción

En el 2030, el 47% de la población mundial vivirá en zonas con estrés hídrico. La mayor parte del crecimiento de la población estará localizada en países en desarrollo, en regiones sin un acceso sostenible al agua potable ni a un saneamiento adecuado” (UNESCO 2013).

Según INEI (2013) con un 3.45 % de crecimiento demográfico en el año 2012, hace de la ciudad de Cajamarca la ciudad con mayor crecimiento demográfico en el Perú (1.13%). Si seguimos la tendencia de este hecho, hablaríamos también de un incremento de demanda del recurso hídrico en los siguientes años para la región de Cajamarca.

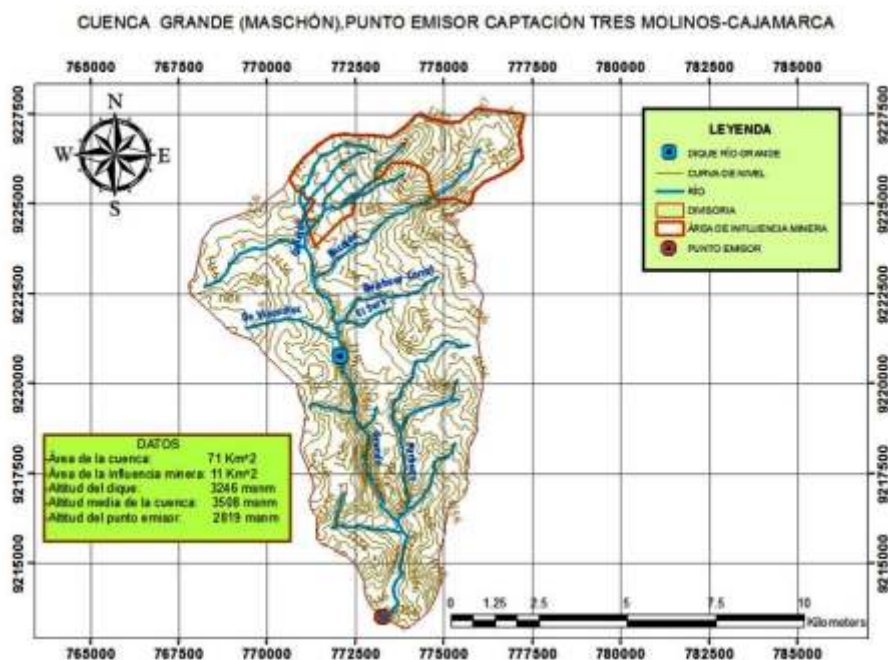
Kuijk (2015) señala que no hay una línea de base de la hidrología natural en la cuenca Grande de Mashcón, y esto complica una evaluación del impacto de la minería en la disponibilidad del agua. Según EPS Sedacaj S.A., entre 1977-1998 en el río Mashcón<sup>1</sup>, el caudal mínimo se registró en 1992, siendo de 300lps. Esto coincide con el comienzo de las operaciones de MYSRL. Las dos series de medidas de caudales en el río Grande de Mashcón que son suficientemente largas, fueron elaboradas en 2002 y 2013-2014, de los cuales se puede deducir una reducción de las aguas superficiales en el río durante los primeros años de la explotación de la mina. Más adelante los caudales se han estabilizado, aparentemente debido a la implementación de la gestión de recursos hídricos de MYSRL, la cual fue iniciada en 2006. En los objetivos de esta gestión está mencionado claramente que,

por medio del bombeo de agua en corrientes superficiales, se asegura suficiente agua para el riego río abajo en la temporada seca.

Ante la problemática de la falta de información hidrométrica en los ríos, han surgido algunos métodos y modelos hidrológicos que generan caudales mensuales, sin embargo, éstos modelos sólo han resuelto el problema de forma parcial, pues usan fórmulas empíricas o tienen rango limitado de aplicación, entre estos modelos se encuentra el modelo Determinístico Estocástico, desarrollado en el Perú para grandes cuencas (Scholz 1980), por lo que aplicarlo en pequeñas cuencas sin la validación respectiva representa incertidumbre en los resultados obtenidos (Terán 2014).

## Materiales y método

Se caracterizó la cuenca Grande mediante sus parámetros geomorfológicos, haciendo uso de softwares como: Autocad, Excel y Google. Tanto la precipitación mensual total como la efectiva se obtuvieron con el método de Thiessen y cuatro estaciones pluviométricas para un período 1968-2106. El coeficiente de escorrentía mensual se obtuvo aplicando el método de la FAO.



**Figura 1.** Cuenca grande (Mashón) Punto emisor captación tres molinos.

La generación de caudales medios mensuales (mm/mes) se realizó aplicando el método determinístico estocástico de Lutz Scholz, el cual se basa en un balance hidrológico multianual con variables de precipitación efectiva, gasto de la retención y abastecimiento de la retención de la cuenca; además hace uso

de la cadena de Markov con las planillas de la precipitación efectiva.

La ecuación fundamental que describe el balance hídrico mensual en mm/mes es la siguiente:

$$CM_i = P_i - D_i + G_i - A_i \quad (1)$$

Dónde:

$CM_i$  : Caudal mensual (mm/mes)

$P_i$  : Precipitación mensual sobre la cuenca (mm/mes)

$D_i$  : Déficit de escurrimiento (mm/mes)

$G_i$  : Gasto de la retención de la cuenca (mm/mes)

$A_i$  : Abastecimiento de la retención (mm/mes)

Bajo la suposición de que exista un equilibrio entre el gasto y el abastecimiento de la reserva de la cuenca y además que el caudal total sea igual a la precipitación efectiva anual, la contribución de la reserva hídrica al caudal se puede calcular según las fórmulas:

$$R_i = CM_i - P_i \quad (2)$$

$$CM_i = PE_i + G_i - A_i \quad (3)$$

Generación de caudales mensuales para el año promedio (Qm): La ecuación básica se simplifica de la forma siguiente:

$$Qm_i = PE_i + G_i - A_i \quad (4)$$

Donde:

Qmi : Caudal mensual (mm/mes)

PEi : Precipitación efectiva mensual (mm/mes)

Gi : Gasto de la retención (mm/mes)

Ai : Abastecimiento de la retención (mm/mes)

### Generación de caudales mediante el modelo determinístico-estocástico:

$$Z = z(S)\sqrt{(1 - r^2)} \quad (5)$$

### Ecuación integral para generación de caudales:

$$Q_t = B1 + B2(Q_{t-1}) + B3(PE_t) + z(S)\sqrt{1 - r^2} \quad (6)$$

Donde:

Q<sub>t</sub> = Caudal del mes t

Q<sub>t-1</sub> = Caudal del mes anterior

PE<sub>t</sub> = Precipitación efectiva del mes

B1 = Factor constante o caudal básico.

B2, B3 = Parámetros del modelo para el año promedio

z = Variable aleatoria (0,1): números aleatorios normal estándar

S = Desviación estándar de los residuos

El volumen de agua aprovechable proveniente de la cuenca Grande se estimó para usos: Agrícola, pecuario, consumo humano, industrial e hidroenergía; asumiendo que no se deriva el agua desde los recursos naturales, tanto para el caso de la cuenca sin impactar (área de la cuenca = 71 km<sup>2</sup>) como para el caso de cuenca impactada (área de la cuenca = 60 km<sup>2</sup>). Los valores se obtuvieron para los

percentiles de 75%, 80%, 90% y 95%.

## Resultados y discusión

### Retención de la cuenca (R)

Parte del agua que se precipita queda retenida en los acuíferos y en lagunas que según Lutz Scholz se estima con los parámetros señalados en la tabla 1.

**Tabla 1.** Parámetros para calcular la retención en la cuenca Grande.

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Coficiente	Ca	20	%
Almacenamiento acuíferos	LA	295.625	mm/año
Área de la cuenca	AR	71.0	km <sup>2</sup>
Pendiente del cauce principal	I	0.0725	m/m
Área de lagunas	AL	0	km <sup>2</sup>
Almacenamiento lagunas y pantanos	LL	500	mm/año
Área de nevados	AN	0	km <sup>2</sup>
Almacenamiento de nevados	LN	0	Mm/año

$$LA = (-750)(0.075) + 350 = 295.625 \text{ mm/año}$$

$$R = \frac{(0.20)(71.0)(295.625)}{71} = 59.1 \frac{\text{mm}}{\text{año}}$$

Ecuación integral para generación de caudales mensuales (mm/mes) es:

$$Qt = 2.898 + 0.455 (Q t-1) + 0.4798 (PE t + 2.57 (Z))$$

La precipitación media de la cuenca Grande, para el período 1968-2016, muestra que en dichos años se ha mantenido el régimen de lluvia, mostrando meses lluviosos (octubre, noviembre, diciembre, enero, febrero, marzo, abril y mayo) y meses con escasa precipitación pluvial (junio, julio, agosto y setiembre). En promedio, el mes más lluvioso es Marzo con 158.6 mm y el menos lluvioso Julio con 10.6 mm; esta variación es característica en la región Cajamarca. La aplicación del modelo determinístico estocástico Lutz Scholz para generar caudales medios mensuales en la cuenca Grande, en mm/mes, toma en cuenta

que el mes más lluvioso es Marzo, lo que concuerda con la precipitación media de área de Marzo, hallada con el método de los Polígonos de Thiessen, indicando que es el mes de mayor abastecimiento de agua que se almacena en la cuenca. La retención (59.1 mm/año) representa el 6% del promedio del módulo de precipitación (978.3 mm), lo cual concuerda para cuencas de la sierra peruana; el coeficiente de agotamiento (0.012258 días<sup>-1</sup>) muestra que se trata de una cuenca con agotamiento rápido. Esto se considera lógico porque en los meses poco lluviosos el caudal tiene una gran disminución comparado con los de los meses lluviosos.

En vista de no contar con medidas históricas de caudales (m<sup>3</sup>/s) en la cuenca Grande, fue imposible calibrar el modelo; sin embargo, lo que motivó generar caudales medios en mm/mes se considera satisfactorio.

**Tabla 2.** Volumen (MMC) de agua aprovechable, producida por la cuenca Grande sin impactar, tomando como punto de descarga la captación Tres Molinos.

USO	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Agr. Pecuario	3.24	3.23	4.00	3.68	2.78	1.69	1.04	0.88	1.29	2.25	2.68	3.03
Consumo HH	3.05	3.02	3.79	3.51	2.67	1.63	0.97	0.82	1.22	2.12	2.52	2.85
Industrial	2.68	2.61	3.37	3.18	2.45	1.51	0.85	0.68	1.06	1.87	2.21	2.49
Hidroenergía	2.49	2.40	3.16	3.01	2.34	1.44	0.78	0.61	0.98	1.75	2.05	2.31

**Tabla 3.** Volumen (MMC) de agua aprovechable, producida por la cuenca Grande, impactada por actividad minera en la parte alta, con punto emisor en la captación Tres Molinos.

USO	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Agr. Pecuario	2.74	2.73	3.38	3.11	2.35	1.43	0.87	0.75	1.09	1.90	2.26	2.56
Consumo HH	2.58	2.56	3.21	2.97	2.26	1.38	0.82	0.69	1.03	1.79	2.13	2.41
Industrial	2.26	2.20	2.85	2.69	2.07	1.27	0.72	0.57	0.89	1.58	1.86	2.10
Hidroenergía	2.10	2.03	2.67	2.55	1.98	1.22	0.66	0.52	0.83	1.48	1.73	1.95

Los volúmenes de agua disponibles tanto para el caso de cuenca sin impactar y cuenca impactada por actividad minera muestran una clara diferencia de reducción y predominio actual de uso en actividad industrial en la cuenca Grande, que se debe tomar en cuenta en la gestión del recurso hídrico. Además la variación mensual de dichos volúmenes está relacionada con el régimen de la precipitación pluvial durante el año.

## Conclusiones

1. La cuenca Grande (unidad hidrográfica perteneciente a la cuenca Mashcón de Cajamarca), con punto emisor en la captación de agua para riego Tres Molinos, es del tipo alto andina, con área de 71.0 km<sup>2</sup>, altitud media de 3508.5 m.s.n.m., pendiente de laderas 27.24% e índice de Gravelius 1.35. El cauce principal se denomina Grande con una pendiente de 7.25%, donde se ha observado que el agua es derivada fundamentalmente para uso agrícola y pecuario; pero en la parte alta se utiliza el agua en actividades de explotación minera a tajo abierto, lo que ha reducido el área de drenaje de la cuenca a 60.0 km<sup>2</sup>.
2. La precipitación pluvial, tanto para la cuenca Grande no impactada e impactada por actividades mineras es la misma para el período 1968-2016, mostrando el régimen característico de meses lluviosos y meses con escasa precipitación pluvial, siendo el mes más lluvioso Marzo con 158.6 mm y el de menor pluviosidad Julio con 10.6 mm. La precipitación efectiva que fue obtenida con el coeficiente de escorrentía medio anual (0.545) refleja en los meses de escasa precipitación valores entre 31.9 mm a 5.8 mm, notándose una importante pérdida cada año durante los meses lluviosos.
3. Los caudales medios mensuales (mm/mes) generados por el modelo determinístico estocástico Lutz Scholz (período 1968-2016), varían en relación al régimen de precipitación pluvial de la cuenca Grande; tal que en los meses lluviosos varía de 71.2 mm/mes a 46.9 mm/mes y en los meses de escasez varía de 40.5 mm/mes a 28.2 mm/mes, notándose una gran diferencia entre ambos períodos. Dichos caudales incluyen la escorrentía directa y el flujo base.
4. El volumen de agua disponible (MMC) para diferentes usos, producida por la cuenca Grande sin impactar, tomando como punto de descarga la captación Tres Molinos,

tiene fuertes variaciones. Para uso agrícola y pecuario el mayor volumen es 4.00 MMC (Marzo) y el menor 0.88 MMC (Agosto); para consumo humano el mayor volumen es 3.79 MMC (Marzo) y el menor 0.82 MMC (Agosto); para uso industrial el mayor es 3.18 MMC (Marzo) y el menor 0.68 MMC (Agosto); para hidroenergía 3.16 MMC (Marzo) y 0.61 MMC (Agosto).

5. El volumen de agua disponible (MMC) para diferentes usos, producida por la cuenca Grande impactada por actividad minera, tomando como punto de descarga la captación Tres Molinos, tiene fuertes variaciones. Para uso agrícola y pecuario el mayor volumen es 3.38 MMC (Marzo) y el menor 0.75 MMC (Agosto); para consumo humano el mayor volumen es 3.21 MMC (Marzo) y el menor 0.69 MMC (Agosto); para uso industrial el mayor es 2.85 MMC (Marzo) y el menor 0.57 MMC (Agosto); para hidroenergía 2.67 MMC (Marzo) y 0.52 MMC (Agosto).

## Referencias bibliográficas

- INEI. 2013. <http://www.inei.gob.pe>
- Kuijk, L. 2015. Water usage efficiencies for irrigation in Northern Perú. A case study in Cajamarca, a region affected by mining industry. Universidad de Leuven. Bélgica.
- Scholz, L. 1980. Generación de Caudales Mensuales en la Sierra Peruana. Plan Meris II, Cusco.
- Terán, N. 2014. Volumen aprovechable en la microcuenca del río Tres Ríos, usando el modelo determinístico-estocástico Lutz Scholz, validado para los años hidrológicos 2008-2012. Universidad Nacional de Cajamarca. Perú.
- UNESCO. 2013. <http://www.unesco.org/new/es>