

DETERMINACIÓN DE LA RECARGA POR PRECIPITACIÓN APLICANDO EL MODELO HIDROLÓGICO HELP EN LA ZONA DE LA MAYCA.

Bustamante Ponce Mauricio¹ & González Sánchez Álvaro De Jesús²

RESUMEN

La recarga por precipitación es una componente importante para el desarrollo de balances hídricos, pero a la vez difícil de determinar mediante métodos directos. Acorde con su valor, se diseñan políticas de protección y aprovechamiento de los recursos hídricos subterráneos. Este artículo presenta el estudio realizado para la determinación de la recarga en la zona de La Mayca, en Cochabamba- Bolivia, caracterizada por sus suelos finos que limitan el índice de infiltración. Se ha utilizado el método de perforación de carga constante del permeámetro Guelph para la determinación de la conductividad hidráulica en campo, aplicando la solución de Elrick obteniéndose resultados muy coherentes con el tipo de suelo. Con el modelo hidrológico HELP, que realiza una modelación del tránsito de agua a través de la zona no saturada, se determinó la recarga a partir de los datos generados en campo y laboratorio, éstos se presentan en mapas desarrollados en sistema de información geográfica, distinguiéndose dos zonas, la zona sur que presenta una recarga de hasta 59,79 mm/año y la zona noreste que presenta una recarga de 28,43 mm/año, en comparación con 394 mm/año de precipitación. Se determinó que, en la actualidad, en la zona de La Mayca no se presenta sobre explotación del acuífero, ya que el 22,8 % del agua de recarga es explotada por bombeo por los comunarios, sin embargo, en la zona no existe políticas de protección y a mediano plazo esta condición podría cambiar por la perforación sin control de pozos.

Palabras clave: Recarga, conductividad hidráulica, permeámetro Guelph, Modelo Help.

¹ Profesor de la Carrera de Ingeniería Civil de la UPB, bustamenteponce.m@gmail.com

² PhD.c., Ingeniero Civil consultor

1 INTRODUCCIÓN.

Se denomina recarga al proceso por el cual se incorpora a un acuífero agua procedente del exterior del mismo. Igualmente, se llama recarga al volumen de agua que penetra en el acuífero durante un intervalo de tiempo dado (Custodio, 1998).

El conocimiento de los mecanismos de recarga y la cuantificación de la misma, es un elemento fundamental en la gestión de un acuífero, ya sea para evaluar los recursos explotables, conocer el eventual grado de sobre explotación como adecuar las actuaciones sobre el mismo para su desarrollo sostenible.

El modelo HELP (Hydrologic Evaluation of Landfill Performance) fue elaborado por WHI (Waterloo Hydrogeologic Inc.). En mayo de 1998, fue desarrollado para interfase de Windows 95/98/NT bajo el nombre de Visual HELP. El modelo HELP es versátil, constituyendo una herramienta para el diseño, evaluación y optimización de la hidrología de rellenos sanitarios, así como para calcular las tasas de recarga de acuíferos.

2 ZONA DE ESTUDIO.

La Mayca pertenece al distrito 9, zona sur de la ciudad de Cochabamba, lado suroeste del aeropuerto departamental.

La zona se caracteriza por ser la zona de menor elevación de la cuenca del valle central del departamento de Cochabamba. Por tal motivo, es donde se concentra el escurrimiento natural, formando la laguna Kenamari por la acumulación de agua de precipitación.

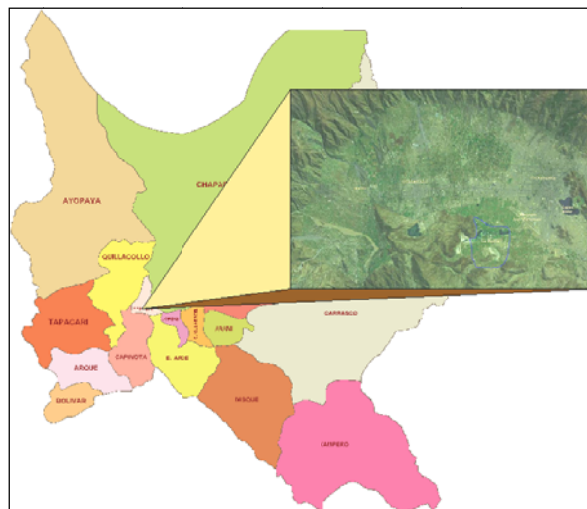


Fig. 1 – Mapa de Cochabamba en que se muestra la zona de estudio.

La estación climática más cercana es la Estación AASANA, ubicada en el Aeropuerto Jorge Wilstermann que se halla en la zona sur del departamento de

Cochabamba. Dista 2,5 Km de la zona de estudio y sus datos se consideran válidos para el área en atención a su cercanía y porque ésta cuenta con personal calificado.

El sistema climatológico es estacional, el tiempo de lluvias se presenta en los meses de noviembre a marzo, alcanzando una precipitación media de 394 mm al año (Renner y Velasco, 2000).



Fig. 2 – Imagen satelital de la zona de estudio.

Los suelos de la zona de estudio son, primordialmente, cuaternario fluvial y lacustre, con afloramientos del sistema Ordovícico como el cerro de Kenamari y el cerro de Pucarita (Renner y Velasco, 2000).

Los sedimentos cuaternarios están distribuidos en la zona de estudio, consta desde arenas finas en la zonas elevadas (Azirumarca, hacia fortaleza) hasta material fino como limos y arcillas en la parte central y parte norte. Su origen se debe tanto a la deposición de los materiales transportados por los glaciales como por los ríos que desciende de las partes altas hacia la zona de los lagos que cubrían la cuenca del Valle de Cochabamba.

El estudio de Renner y Velasco del 2000 categoriza a La Mayca como zona baja, donde se presenta zonas pantanosas y, en algunos casos, eflorescencias salinas.

Se considera que la zona de estudio es en esencia una zona de descarga a recarga baja, especialmente en las partes aledañas al río Rocha.

3 CARACTERIZACIÓN DE SUELOS

En los trabajos de campo realizados para el estudio, se tomaron muestras de suelos de la superficie y de diferentes niveles en varios puntos de la zona de estudio. Se analizaron en laboratorio la textura de suelos, la porosidad, la capacidad de campo y el

punto de marchitez permanente. En la figura 3 se muestra la zona de estudio con los puntos donde se tomaron las muestras.



Fig. 3 – Imagen satelital de la zona de estudio.

Los resultados alcanzados se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1 – Resultados del análisis de suelos.

Id.	Prof. [cm.]	Textura	θ %	n %	CC %	PMP %
B1.1	27	FYL	7.5	35.7	32.3	18.3
B1.2	52	FY	8.2	31.6	27.5	15.4
B1.3	82	FY	12.6	26.3	21.4	11.9
B1.4	110	YL	23.3	35.8	30.2	16.7
B1.5	145	FY	24.2	44.2	26.5	17.6
B2.1	34	F	7.5	31.4	19.8	10.8
B2.2	63	FYL	17.9	33.3	21.5	11.3
B2.3	96	FL	8.5	42.3	22.4	9.0
B3.1	25	F	2.8	30.8	11.5	6.4
B3.2	67	FY	9.4	43.8	29.7	18.6
B3.3	97	FY	11.4	35.4	21.7	10.5
B4.1	25	F	3.6	42.2	13.4	6.1
B4.2	61	FYA	2.4	52.3	12.0	7.6
B4.3	93	FA	1.6	48.2	5.8	3.2
B5.1	40	FL	5.9	42.3	22.4	9.0
B5.2	65	FL	5.6	44.5	18.4	7.0
B5.3	90	FL	7.0	48.2	18.6	7.1
B5.4	119	FL	9.9	36.2	17.4	8.5
B6.1	30	FL	22.8	36.2	17.4	8.5
B7.1	32	AF	23.1	48.2	5.8	3.2
B8.1	27	FL	22.8	36.2	17.4	8.5
B8.2	101	FL	20.5	48.2	17.4	8.5
B9.1	27	FY	17.9	44.1	18.9	9.2
B10.1	29	FY	9.9	44.3	18.7	9.5
B10.2	67	Y	16.5	43.5	18.79	9.35
B10.3	97	FYL	18.8	43.5	18.79	9.35
B11.1	30	FY	11.3	40.2	18.35	9.41
B11.2	63	FY	12.6	42.4	18.19	9.53

4 CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA SATURADA DE CAMPO.

La conductividad hidráulica es la medida física de la rapidez con que un acuífero transmite agua a través de él.

Este parámetro se determinó mediante la aplicación del método de carga constante en un orificio, con el uso del permeámetro Guelph, que es un equipo de manufactura Soilmoisture Co, empresa de California, USA. Este equipo determina el índice de ingreso de agua al suelo aplicando el principio de Mariot.

El método de solución utilizado fue la solución de Elrick, que se aplica a una sola carga de agua en el orificio, en este caso una carga de 20 cm. Este método utiliza la siguiente expresión:

$$K_{fs} = \frac{C Q_s}{\left[2\pi H^2 + C\pi a^2 + \left(\frac{2\pi H}{\alpha^*} \right) \right]} \quad (1)$$

donde Q_s es el índice de ingreso de agua al suelo en $[m^3/s]$; H la carga de agua en el orificio, 20 cma; el diámetro del orificio, 5 cm; C y α^* son los parámetros adimensionales que son función del tipo de suelo y K_{fs} la conductividad hidráulica saturada (m/s).

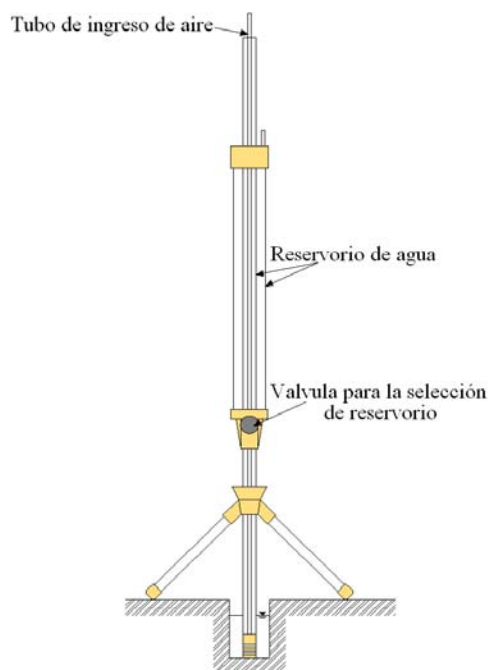


Fig. 4 – Esquema del permeámetro Guelph.

Los resultados alcanzados mediante este ensayo in situ, se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2 – Conductividad hidráulica saturada para la zona de La Mayca.

Id. LH-UMSS	Prof. [cm.]	Coord. UTM		K [m/día]
		Este	Norte	
B1.1	27	797920	8071001	0.739
B1.2	52			0.097
B1.3	82			0.016
B1.4	110			0.002
B1.5	145			0.007
B2.1	34	796822	8069052	0.058
B2.2	63			0.065
B2.3	96			0.116
B3.1	25	796648	8067951	0.279
B3.2	67			0.056
B3.3	97			0.446
B4.1	25	794906	8068164	1.267
B4.2	61			8.853
B4.3	93			2.227
B5.1	40	797885	8071181	0.078
B5.2	65			0.052
B5.3	90			0.543
B5.4	119			0.543
B6.1	30	795326	8071520	0.036
B7.1	32	797538	8071171	4.504
B8.1	27	795540	8071128	0.103
B8.2	101			0.002
B9.1	27	798190	8070488	0.018
B10.1	29	797967	8070037	0.003
B10.2	67			0.010
B10.3	97			0.390
B11.1	30	797293	8069840	0.046
B11.2	63			0.672

5 RECARGA POR PRECIPITACIÓN.

Se dice recarga a la incorporación de agua a la zona saturada del suelo procedente del exterior a éste, la fuente puede ser la precipitación, el riego, los ríos, etc.

Para la determinación de este parámetro se aplicó el modelo hidrológico HELP, que realiza un balance hídrico en un perfil de suelo.

El modelo incluye el generador climático de Markov Chain, que realiza la generación sintética de series climatológica a partir de datos históricos. Para este estudio se usó los datos de la estación pluviométrica de AASANA que dista 2,5 Km de la zona de estudio.

Se define una serie climatológica sintética de 50 años a partir del 2001, esto debido a que se cuenta con datos históricos hasta este año. La precipitación promedio anual obtenida a partir de la generación sintética es de 394,4 mm/año.

Se realizó el análisis para todos los perfiles y se obtuvo los resultados presentados en la Tabla 3.

Tabla 3 – Recarga por precipitación para la zona de La Mayca.

Id. LH-UMSS	NF [m]	Coord. UTM		Recarga [mm/año]
		Este	Norte	
B1	1.9	797920	8071001	101.0
B2	4.2	796822	8069052	63.7
B3	4.7	796648	8067951	57.9
B4	5.0	794906	8068164	48.5
B5	1.8	797885	8071181	44.5
B6	2.0	795326	8071520	37.6
B7	0.8	797538	8071171	71.8
B8	2.2	795540	8071128	41.0
B9	2.1	798190	8070488	24.5
B10	2.3	797967	8070037	41.8
B11	2.5	797293	8069840	30.3

El punto B7 corresponde al lecho del río Rocha, este es de material areno francoso, razón por la que esta recarga es una de las más elevadas, 71,78 mm/año, que corresponde al 18,20 % de la precipitación.

Por otro lado, el punto B1, que se encuentra en la zona de Mayca Central, específicamente al norte de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales, tiene una recarga de 101,4 mm/año, correspondiente al 25,62 % de la precipitación, un valor realmente grande en comparación con los vecinos. Este punto se encuentra en un terreno de cultivo, el suelo está disturbado por el arado y por el sembradío, es por este motivo que la conductividad hidráulica de la primera capa del perfil 1 es muy alta. El hecho que este parámetro, para el primer nivel, sea alto es de gran importancia ya que en esta capa se dan los procesos de vaporación y transpiración, procesos que extraen agua de la infiltración y reducen la que llega al siguiente nivel.

La recarga por precipitación más bajo se encuentra en la zona de Horizonte, en los predios del Batallón agropecuario de la Séptima División del Ejército, perfil B9, con una recarga de 24,50 mm/año, lo que representa un 6,21 % de la precipitación, este valor caracteriza a un suelo franco arcilloso.

Con los valores obtenidos en la Tabla 3, se procedió a realizar la variabilidad espacial de la recarga por precipitación, sin incluir en el análisis los puntos B1 y B7 por los motivos ya mencionados. Para tal efecto, se utilizó el método de estimación lineal ponderada, aplicando para la ponderación el método de la inversa de la distancia, que fue la que dio mejores resultados. En la figura 4 se presentan este análisis.

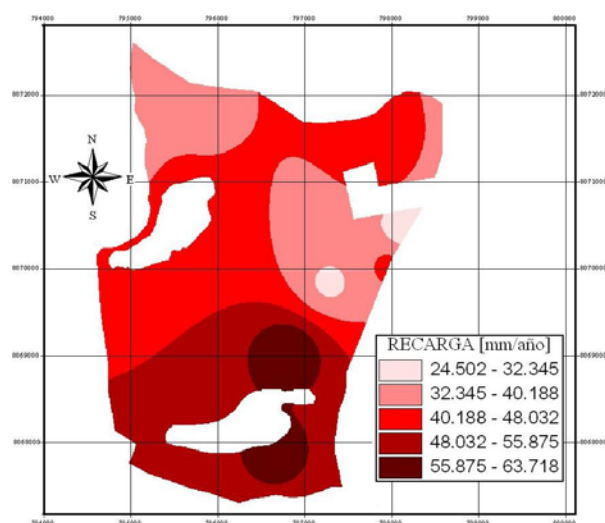


Fig. 4. Variación espacial de la recarga por precipitación, aplicando el método de la inversa de la distancia.

En general, la zona de estudio tiene una recarga por precipitación baja, correspondiendo a un rango entre 24,5 y 63,72 mm/año. Las zonas próximas a la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Alba Rancho, Mayca Central, Mayca Norte y Kenamari tienen las recargas más bajas, entre 24,5 y 48,03 mm/año, estas zonas también son las que tienen los suelos más finos y los niveles freáticos más elevados. Por otro lado, las zonas de Azirumarca, Fortaleza y Pucarita, presentan las recargas más altas de la zona, entre 48,03 y 63,72 mm/año, estas zonas presentan suelos más gruesos y niveles freáticos más bajos.

6 CONCLUSIONES.

La recarga en la zona de estudio es en general baja, concordando con el estudio del PIRHC de 1978, donde se enuncia que la zona sur del valle de Cochabamba tiene suelos de procedencia fluvio lacustre y suelos finos, razón por la que los valores de recarga son bajos.

En función de los resultados, las zonas de Azirumarca, Pucarita y Fortaleza, correspondientes al sector sur, son las que presentan mayores recargas hacia el acuífero freático. Las zonas de Mayca Central, Horizonte, Kenamari, sector norte son las que presentan recargas más bajas, por lo tanto, las autoridades debieran prever planes para proteger y conservar las áreas de recarga a las aguas subterráneas de la zona.

De acuerdo con una comparación rápida de volúmenes de recarga y ritmo de extracción actual de agua subterránea, se tiene que:

- Recarga por precipitación: 551734 m³/año.
- Extracción por bombeo: 125589 m³/año.

En la actualidad, sólo el 22,8% del agua que ingresa como recarga al acuífero está siendo extraída por bombeo, para el acuífero freático. Pero la tasa de perforación de nuevos

pozos es elevada, por tal motivo, se deben desarrollar políticas de control de la explotación del acuífero.

7 REFERENCIAS

Chabernau, Randall J. 2000. **Groundwater Hydraulics and Pollutant Transport**. Prentice Hall. New Jersey, USA.

Ritzema, H. P. 1994. Editor in chief. Braun. H. M. H. Kruijne R. Kabat P. y Beekma J. Drainag, **Principles and Applications**. International Institute for Land Reclamation nad Improvement ILRI. Wageningen, The Netherlands.

Soilmoisture Equipment Corporation, 1991. **2800KI, Operation Instructions**. Soilmoisture Equipment Corp. Santa Barbara, California, USA.

Robertso. 2003. **Permeability Testing in Unconsolidated Materials**. Robertson GeoConsultants Inc. USA.

Fetter, Charles Willard, 1999. **Contaminant Hydrogeology**, Prentice Hall, New Jersey, USA.

Feddes, R.A., Koopmans R.W.R., Van Dan, J.C. 1997. **Agrohydrology**, Department of Environmental Sciences, Sob-department Water Resources, Wageningen University, The Netherlands.

U.S. Army Corps of Engineers, 1999. **EM 1110-2-1421 Groundwater Hydrology Engineering and Desing**, Washington DC 20314.100, USA.

Waterloo Hydrogeologic Inc. User's Manual for WHI UnSat Suite

Isasks Edgard, Srivastava Mohan, 1989. **Applied Geostatistics**, Oxford University Press, Osford, New York, USA.

Dafonte Dafonte, J. Valcárcel Armesto, M. Neira Seijo, X.X. y Paz Gonzales, A. 1999. **Analisis de los Métodos de Cálculo de la Conductividad Hidráulica Saturada de Campo Medida con el Permeametro Guelph**. Estudios de la Zona No Saturada del Suelo. Eds. R. Muñoz-Carpena, A. Ritter, C. Tascón. ICIA: Tenerife. ISBN 84-699-1258-5.

Dafonte Dafonte J, Paz Gonzales A, Tabeada Castro M.M y Rosa Viera S. 1999. **Variabilidad Espacial de la Conductividad Hidráulica Saturada de Campo Medida con Permeametro Guelph**.

Bagarello Vincenzo, Iovino Máximo y Giuseppa Tusa. 2000. **Factors Affecting Measurement of the Near-Saturated Soil Hydraulic Conductivity**.

Diaz, E. Duarte, O. Cerena, J. y Fontanini, P. 2003. **Ajuste Metodológico en la Medición de la Conductividad Hidráulica Saturada "In Situ" en Suelos Vertisoles y Entisoles de la Republica de la Argentina Mediante el Permeametro de Guelph**. Estudios de la Zona No Saturada del Suelo Vol. VI. Álvarez-Benedi y P. Marinero.

Heredia, Javier y Murillo, José Manuel. **Balance Hídrico y Estimación de la Recarga Mediante Modelación Numérica en Pequeñas Cuencas del Sector Sudoriental de la Isla de Gran Canaria**. Instituto Geológico y Minero de España.

Neumann-Redlin, Renner y Torrez, **Manejo de Aguas Subterráneas para la Ciudad de Cochabamba, Bolivia.**

Richardson C.W. y Wright D.A. 1984. **WGEN: A Model for Generating Daily Weather Variables.**