Proyecto 14 INV-190 **PRODUCTO 3**

INFORME: Modelamiento y definición de balance hídrico del Acuífero Patiño con PMWIN Simulaciones en estado transitorio, considerando distintos escenarios para el periodo 1985 a 2030

Verónica Rojas Scheffer, M.Sc.

Contenido

1. Introducción 1
2. Método 2
2.1 Condiciones iniciales para los cuatro escenarios de simulación 2
2.2 Comparación con indicadores de sostenibilidad 4
3. Resultados 5
3.1 Balance hídrico 7
3.2 Recarga desde aguas superficiales y descarga residual a aguas superficiales 7
3.3 Aporte y descarga de almacenamiento del acuífero 9
3.4 Descenso de nivel de agua subterránea 10

1. Introducción

El objetivo general del desarrollo de un modelo numérico de flujo de agua subterránea para el Acuífero Patiño es comprender mejor la dinámica del sistema de aguas subterráneas del acuífero. Los objetivos específicos considerados en esta etapa fueron: representar las condiciones de equilibrio del sistema por medio de un modelo en estado estacionario, para luego simular las condiciones actuales del sistema, a través de un modelo en estado transitorio y, finalmente, simular distintos escenarios futuros, bajo diferentes condiciones de extracción y recarga.

El objetivo de este informe es presentar los resultados obtenidos de distintas simulaciones, realizadas considerando un periodo de tiempo de 45 años (desde 1985 hasta 2030). Los diferentes escenarios definidos para las simulaciones se obtuvieron combinando dos variantes -que se describen a continuación- para las condiciones de extracción, con dos variantes -también descritas más adelante en el presente informe- para las condiciones de recarga del acuífero.

Las condiciones de extracción asumidas fueron las siguientes: 1) considerando la misma tasa de crecimiento para la extracción que la asumida en las simulaciones anteriores (ver Informe N.° 2), basada en datos de extracción conocidos hasta el año 2007; y 2) considerando una tasa de crecimiento menor para la extracción desde el año 2007, considerando dicha tasa igual a la tasa de crecimiento poblacional media para la región y para el período simulado. Las condiciones asumidas para la recarga fueron: 1) manteniendo constante la recarga (calibrada previamente en el modelo estacionario); y 2) tomando una recarga creciente, cuya tasa de crecimiento se consideró igual a la tasa de crecimiento poblacional media entre los años de simulación. Este aumento considerado en

la recarga se basa en que la zona cuenta con una cobertura muy baja de alcantarillado sanitario (alrededor del 10% según el MOPC[1]), siendo cámaras sépticas y pozos ciegos la forma de disposición mayoritaria para las aguas residuales domésticas. En otras investigaciones relacionadas a áreas urbanas con escasa cobertura de alcantarillado sanitario, se estimó que la recarga urbana en estos casos puede llegar hasta al 90% de la extracción (Kruse, y otros, 2013; Foster, Morris, & Chilton, 1999).

Para las simulaciones mencionadas, se mantuvieron los mismos parámetros de entrada independientes del tiempo presentados en el Informe N.° 1 (para ambos modelos: en estado estacionario y en estado transitorio). Dichos parámetros son los requeridos por el software PMWIN (*Processing Modflow for Windows*), que fue utilizado para el desarrollo del modelo y la realización de las simulaciones.

En este informe se presentan los resultados obtenidos en cuatro simulaciones en estado transitorio, realizadas asumiendo las condiciones para extracción y recarga mencionadas anteriormente.

2. Método

2.1 Condiciones iniciales para los cuatro escenarios de simulación

Para las cuatro simulaciones presentadas en este informe, se tomaron los mismos parámetros de entrada independientes del tiempo presentados en el Informe N.° 1. La calibración para el modelo en estado transitorio se realizó calibrando el parámetro Productividad específica (*Specific Yield*) del acuífero, con base en datos de nivel estático obtenidos entre 2010 y 2015, según se reportó en el mencionado informe.

Para los escenarios presentados, la recarga en el modelo en estado estacionario fue recalibrada, con base en datos de nivel estático del año 2013, ajustando la recarga en las zonas urbanas por medio de calibración automática, pero limitando la variación del ajuste de la recarga en las demás zonas a ± 10%. Con este procedimiento (similar al descrito en el Informe N.° 1) se obtuvo un coeficiente de ajuste de 0.9493 posterior a la calibración en el estado estacionario, y la recarga para las zonas urbanas aumentó entre 75% y 78% respecto a la recarga estimada, lo que puede atribuirse a recarga relacionada con los sistemas de saneamiento *in situ* de estas áreas, con base en investigaciones anteriores (Kruse, y otros, 2013; Foster, Morris, & Chilton, 1999), y también puede relacionarse con pérdidas provenientes del sistema de distribución de agua potable.

Se describen a continuación las condiciones consideradas para los cuatro escenarios simulados en estado transitorio, para el periodo 1985 a 2030. Los parámetros de entrada independientes del tiempo presentados en el Informe N.° 1 fueron aplicados en estas simulaciones, y no se describen en detalle en el presente informe. En cada uno de estos escenarios, se calibró el parámetro *Specific Yield* con base en datos de nivel freático en pozos de observación correspondientes a los años 2010 a 2013 (PMSAS & SEAM, 2016), siguiendo el procedimiento reportado en el Informe N.° 1.

En la Tabla 1 se presenta un resumen de las condiciones asumidas para los distintos escenarios, además de los indicadores del ajuste entre cargas hidráulicas simuladas y observadas, obtenidos luego de la calibración para cada caso. En la Figura 1 se muestra una comparación entre las

[1] Entrevista al Ingeniero Francisco Martínez, presidente de la Asociación Latinoamericana de Ingenieros Sanitarios. Obtenido en: http://www.mopc.gov.py/paraguay-entre-los-paises-latinoamericanos-con-menor-cobertura-de-alcantarillados-sanitarios-n4126

condiciones asumidas para recarga y bombeo, y la recarga calibrada para el modelo en estado estacionario.

Tabla 1. Comparación entre condiciones aplicadas para cuatro simulaciones, en estado transitorio, variando las condiciones asumidas para la recarga y para la extracción por bombeo

	Escenarios de simulación – Estado transitorio			
Parámetro	TR 05	TR 06	TR 07	TR 08
Extracción total 2020 (Mm^3/año)	494.10	431.69	431.69	494.10
Extracción total 2030 (Mm^3/año)	607.88	515.86	515.86	611.98
Variación de tasa de extracción entre 1985 y 2030	Aumenta linealmente 3.05% hasta 2030	Aumenta linealmente 3.05% hasta 2007, luego aumenta 1.8% hasta 2030	Aumenta linealmente 3.05% hasta 2007, luego aumenta 1.8% hasta 2030	Aumenta linealmente 3.05% hasta 2030
Recarga total 2020 (Mm^3/año)	266.07	500.33	266.07	500.33
Recarga total 2030 (Mm^3/año)	266.07	604.03	266.07	604.03
Variación de tasa de recarga entre 1985 y 2030	Recarga constante e igual a recarga calibrada	Recarga aumenta 1.88% hasta 2030	Recarga constante e igual a recarga calibrada	Recarga aumenta 1.88% hasta 2030
Coeficiente de correlación, post calibración	0.9290	0.9325	0.9300	0.9317
Error estándar de residuales (m)	11.20	10.51	11.09	10.60

Fuente: Elaboración propia

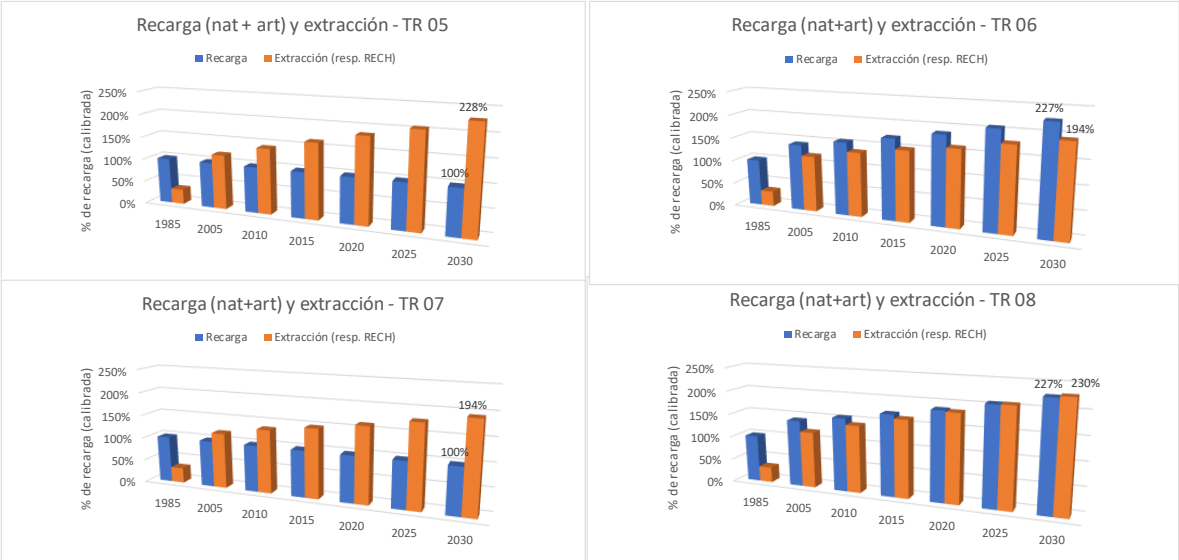


Figura 1. Comparación de las condiciones asumidas para recarga y extracción por bombeo en los cuatro escenarios presentados, con la recarga calibrada en el modelo en estado estacionario

2.2 Comparación con indicadores de sostenibilidad

La línea de base para los indicadores de sostenibilidad fue definida en el inicio de las simulaciones en estado transitorio, correspondiendo además a los resultados del modelo en estado estacionario, posteriores a la calibración.

Para evaluar los cambios sufridos por las entradas y salidas del acuífero (con respecto al estado estacionario), se examinaron las condiciones de recarga, extracción por bombeo, entradas y salidas desde/hacia aguas superficiales y, finalmente, los aportes recibidos y las descargas correspondientes al almacenamiento del acuífero.

Es importante recordar que el aporte o descarga del almacenamiento del acuífero se considera nulo en el estado estacionario (Theis, 1940) y que, en el estado transitorio, en respuesta a una mayor extracción se espera que el sistema de agua subterránea inicialmente responda con aporte desde el almacenamiento pero, a medida que transcurre el tiempo, el sistema debería tender a un nuevo estado de equilibrio (es decir, el aporte desde el almacenamiento debe ir disminuyendo, y la extracción mayor debe ser cubierta por recarga inducida desde aguas superficiales, y/o disminución de descarga residual a aguas superficiales (Zhou, 2009; Bredehoeft, 1997; Theis, 1940). No obstante, este nuevo estado de equilibrio puede no ser posible, o puede tardar cientos y hasta miles de años en ser alcanzado (Zhou, 2009).

En este informe, se presentan los resultados obtenidos para distintos elementos del balance hídrico en los cuatro escenarios, realizando comparaciones con los resultados correspondientes al estado estacionario.

3. Resultados

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de los distintos escenarios simulados en el estado transitorio, para el periodo 1985 a 2030. La Tabla 3 resume los resultados de las simulaciones para el año 2030, comparándolos además con la línea de base para los distintos indicadores de sostenibilidad.

Es importante tener en cuenta que la condición de borde asignada tanto al Río Paraguay, como a los ríos y arroyos interiores al dominio del modelo, fue la de carga hidráulica constante. Esta consideración permitió, por un lado, la simplificación del modelo -porque se impone que la carga hidráulica en las aguas superficiales se mantenga constante e igual a la obtenida a partir del DEM (mapa de elevación digital). Esta representación se considera adecuada en casos en los que el nivel freático se encuentra cercano a la superficie del terreno (como en regiones de clima húmedo y relieve topográfico suave) (Sanford, 2002). Por otro lado, dicha consideración implica que las aguas superficiales son al mismo tiempo fuentes infinitas y sumideros infinitos de agua (Chiang, 2001).

Las consecuencias de esta condición serían las siguientes: el modelo no puede indicar si un arroyo se quedará sin agua, pero sí puede mostrar en cuáles celdas el agua sale de los arroyos y en cuáles ingresa a los mismos. Si una celda aportaba agua al sistema en el estado estacionario y, desde cierto momento en el estado transitorio, se convierte en una celda de la cual se extrae agua, podríamos considerar que en ese punto el arroyo correría riesgo de “secarse”.

Además, como le estamos exigiendo al modelo que se mantenga la carga hidráulica en las celdas correspondientes a los ríos y arroyos, las tasas de descarga residual no necesariamente serán reales (podrían llegar a ser menores en la realidad, con la consecuente disminución del nivel de agua en ríos y arroyos), y las tasas de recarga proveniente desde los aguas superficiales podrían estar por encima de la realidad, es decir, la recarga inducida necesaria para satisfacer las condiciones de extracción podría ser imposible de alcanzar (Chiang, 2001).

En la Tabla 3 puede observarse que, para todos los escenarios, la recarga proveniente desde aguas superficiales es superior a la recarga desde aguas superficiales en la situación considerada de equilibrio para el acuífero (de 1.7 veces hasta cerca de 3 veces, en los distintos escenarios).

La descarga residual hacia los cursos de agua disminuye con respecto a su valor en el estado estacionario para los escenarios en los que se asume recarga constante, y se mantiene alrededor del mismo valor para los escenarios en los que se consideró que la recarga aumenta, aunque debe recordarse la limitación relacionada a la condición de carga hidráulica constante. El descenso en el nivel estático resultante de todas las simulaciones alcanza valores máximos muy elevados localmente, pero en los escenarios TR 06 y TR 08 (en los que se asumió aumento en la recarga) se tienen también zonas que presentan aumento del nivel estático en los resultados de las simulaciones.

Tabla 3. Resultados obtenidos de simulaciones en estado transitorio, para el año 2030, comparados con los índices de sostenibilidad.

			Escenarios – Estado transitorio							
Restricción	**Estado estacionario (1985)**		TR 05		TR 06		TR 07		TR 08	
P tasa de bombeo	76.03	(Mm3/año)	607.88	(Mm3/año) 228% de la recarga	515.86	(Mm3/año) 194% de la recarga	515.86	(Mm3/año) 194% de la recarga	611.98	(Mm3/año) 230% de la recarga
R_0 recarga natural	266.07	(Mm3/año)	266.04	(Mm3/año)	604.03	(Mm3/año) 227% de recarga en SS	266.05	(Mm3/año)	604.03	(Mm3/año) 227% de recarga en SS
Descarga residual a aguas superficiales	337.46	(Mm3/año)	199.93	59% del estado estacionario	349.39	104% del estado estacionario	211.97	63% del estado estacionario	327.44	97% del estado estacionario
Recarga desde aguas superficiales	147.39	(Mm3/año)	432.86	296% del estado estacionario	253.71	173% del estado estacionario	382.62	261% del estado estacionario	297.08	203% del estado estacionario
Descenso máximo de NE (en pozos de observación)	0 (m)	(ref.)	62.7	(m)	34.3	(m)	54.4	(m)	42.8	(m)
Descenso promedio de NE (en pozos de observación)	0 (m)	(ref.)	4.95	(m)	2.10	(m)	4.58	(m)	2.48	(m)

Fuente: Elaboración propia

3.1 Balance hídrico

A continuación, se presentan los resultados de las variaciones del balance hídrico en determinados años de la simulación, para los distintos escenarios.

La Figura 2 muestra la variación de los distintos elementos del balance hídrico para el periodo de simulación (1985 – 2030), para los escenarios TR 05 a TR 08. Recarga y Extracción forman parte de las condiciones impuestas para la simulación, mientras que el aporte/descarga del almacenamiento y de los ríos y arroyos son resultados de la simulación. En los escenarios TR 05 y TR 07, se observa que el aporte desde las fuentes de agua superficiales supera a la descarga a las mismas desde el año 2010 en adelante; no así en los escenarios TR 06 y TR 08, donde disminuye el ingreso desde aguas superficiales, pero sigue siendo mayor la descarga del sistema de agua subterránea hacia dichos cursos, que el aporte desde ellos.

Figura 2. Variación de los elementos del balance hídrico para el periodo 1985 a 2030, en los escenarios TR 05 a TR 08.

3.2 Recarga desde aguas superficiales y descarga residual a aguas superficiales

La recarga inducida es la recarga que recibe el sistema de aguas subterráneas desde aguas superficiales. La descarga residual es el agua que el sistema de aguas subterráneas aporta para el flujo de aguas superficiales (Bredehoeft, 1997; Zhou, 2009). Cuando aumentamos la extracción por bombeo, el sistema inicialmente extraerá agua del almacenamiento, creando así un gradiente hidráulico favorable para inducir mayor recarga desde los ríos y arroyos, o reducir la descarga a los mismos (Zhou, 2009).

En la Figura 3 se muestra la variación (en porcentaje respecto a los valores correspondientes al estado estacionario) de las tasas de recarga desde aguas superficiales y descarga residual. En la Figura 4 se comparan las variaciones obtenidas en los distintos escenarios simulados, para las tasas de recarga desde aguas superficiales y la descarga a los mismos.

Si bien los valores de las tasas de descarga residual y recarga inducida obtenidas en las simulaciones deben analizarse cuidadosamente, debido a la limitación producida por las condiciones de borde anteriormente citadas, puede observarse que el sistema de aguas subterráneas tiende a alcanzar un nuevo estado de equilibrio en los escenarios TR 06 y TR 08 (en los que se considera aumento en la recarga), y no presenta esa tendencia en los escenarios TR 05 y TR 07.

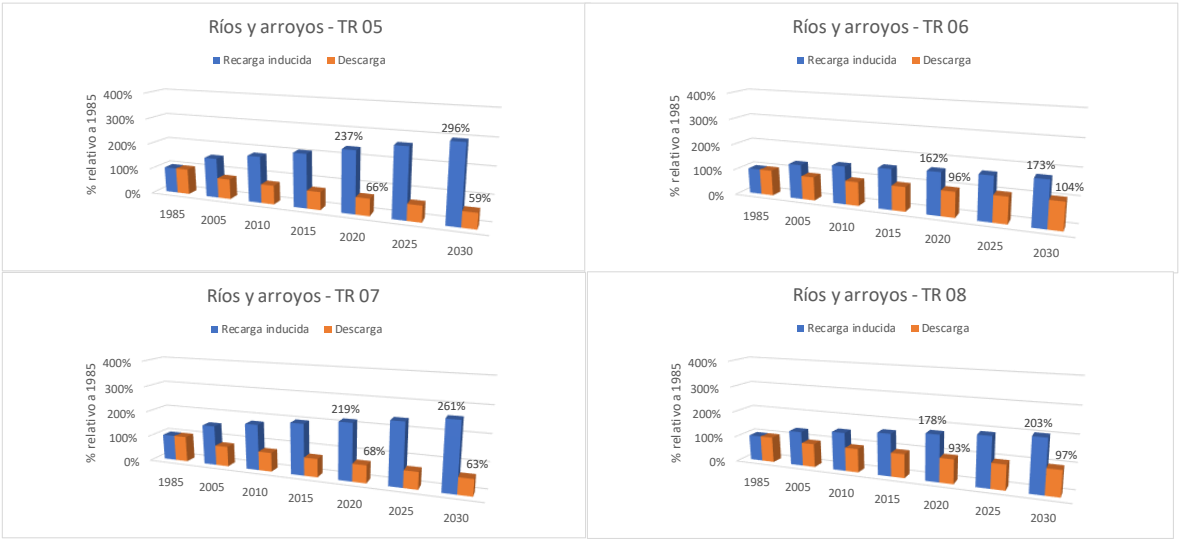


Figura 3. Variación de recarga desde aguas superficiales, y de descarga residual a aguas superficiales, para el periodo 1985 a 2030, en los escenarios TR 05 a TR 08.

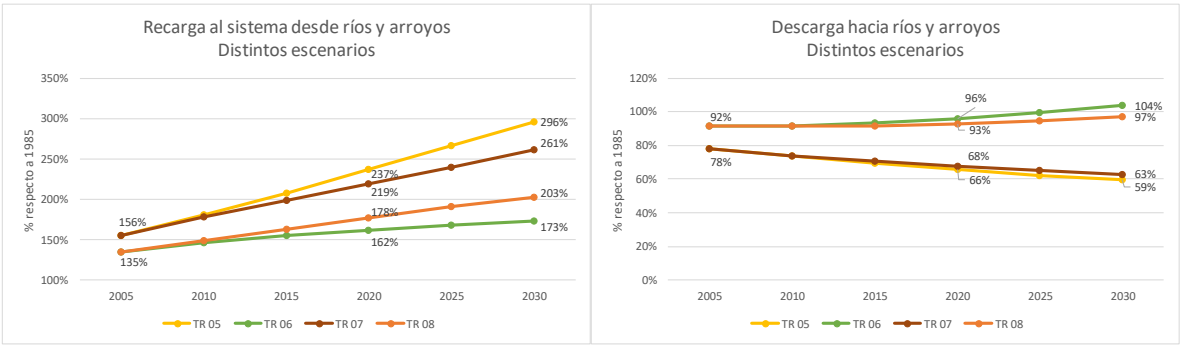


Figura 4. Comparación entre recarga y descarga de aguas superficiales entre 2005 y 2030 para los escenarios TR 05 a TR 08

La Figura 5 muestra resultados obtenidos con PMWIN para los escenarios de simulación TR 05 y TR 08, indicando celdas correspondientes a ríos y arroyos de las que sale (en azul) o ingresa (en rojo) el agua. Es decir, el sistema de agua subterránea se estaría abasteciendo de las celdas en azul, y estaría descargando en las celdas mostradas en rojo. El aumento de la cantidad de celdas en azul (entre 1985 y 2030, para cada escenario) implica que hay más tramos de aguas superficiales que estarían entregando agua; el aumento de la cantidad de celdas en rojo se relaciona con que el sistema debe entregar más agua para satisfacer la condición de carga hidráulica constante en ríos y arroyos.

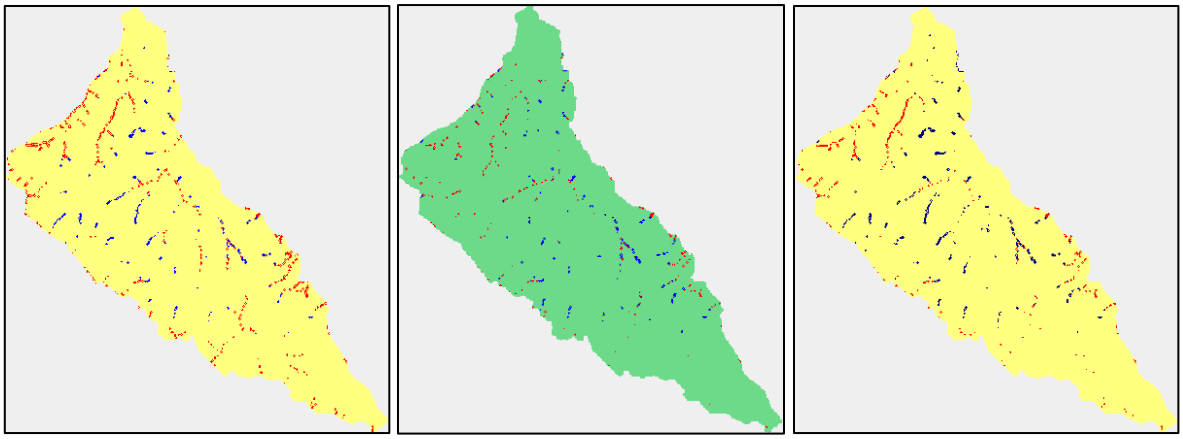


Figura 5. Recarga al sistema de aguas subterráneas desde aguas superficiales y descarga a aguas superficiales para los años 1985 (centro) y 2030, escenario TR 05 (izquierda) y escenario TR 08 (derecha). Celdas que descargan a aguas superficiales en rojo, celdas que recargan desde aguas superficiales en azul.

3.3 Aporte y descarga de almacenamiento del acuífero

Cuando la tasa de extracción es mayor que la recarga total del sistema (considerada igual a la recarga natural más la recarga inducida desde aguas superficiales), dicha extracción utiliza también el agua almacenada en el acuífero. Esto ocasiona el descenso de los niveles de agua subterránea, y podría llegarse al agotamiento del recurso (Zhou, 2009).

En la Figura 6 se muestra la entrada de agua desde el almacenamiento del acuífero para los distintos escenarios. Se observa que, en estas simulaciones, solamente los escenarios TR 06 y TR 08 (en los que se asumió un aumento en la recarga con el tiempo) presentan la tendencia a un nuevo estado de equilibrio (a pesar de que la sostenibilidad de las condiciones para dicho estado de equilibrio deban ser analizadas), mientas que el escenario TR 05 (considerando recarga constante en el tiempo) muestra un uso cada vez mayor del agua del almacenamiento (Observación: en el estado estacionario (o estado inicial, considerado de equilibrio para el sistema, el aporte de agua desde el almacenamiento es nulo). En el escenario TR 07 se presenta una tasa de utilización de agua del almacenamiento aproximadamente constante entre 2005 y 2030, pero esta tasa de utilización iría en aumento de continuar el aumento en la extracción por bombeo.

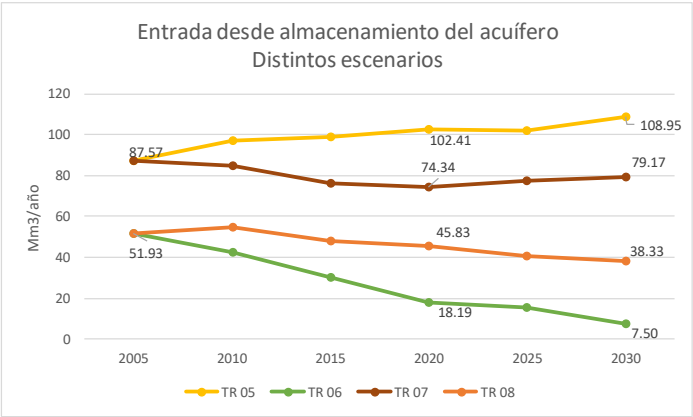


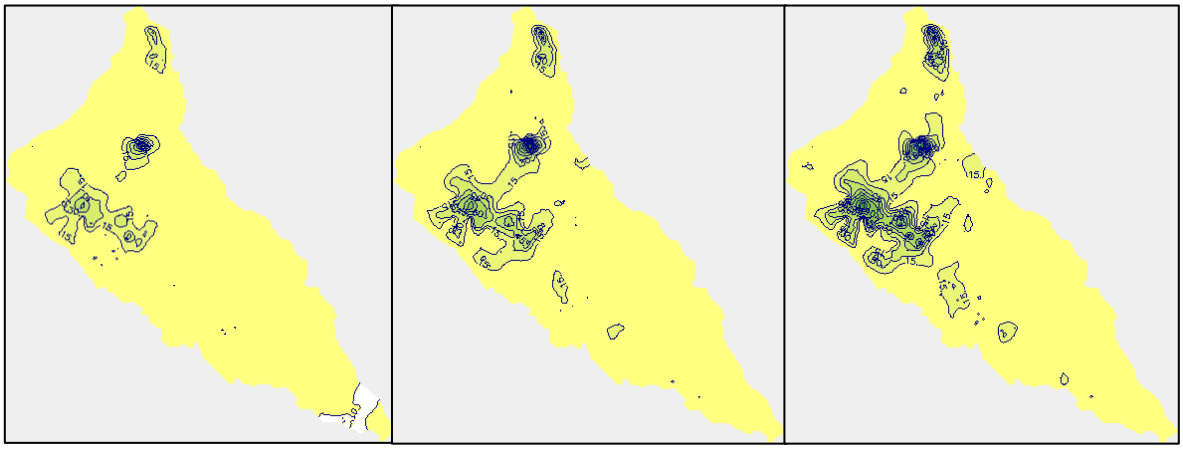
Figura 6. Comparación de aporte desde el almacenamiento del acuífero, para el periodo 2005 a 2030, entre los escenarios TR 05 a TR 08.

3.4 Descenso de nivel de agua subterránea

En la Figura 7, se muestran los resultados de las simulaciones en los escenarios TR 05 y TR 08 para descensos de nivel de aguas subterráneas en los años 2010, 2020 y 2030. Se muestran estos dos escenarios como el mejor y el peor de los casos, respectivamente. Los descensos de nivel presentados corresponden a las zonas que tendrán 5 m o más de descenso de nivel según las simulaciones.

Teniendo en cuenta, además, lo mostrado en la Figura 6, se puede considerar que estos descensos de nivel tenderán a estabilizarse en los escenarios TR 06 y TR 08 (que tienden a un nuevo equilibrio con el correr del tiempo) y continuarían aumentando en los escenarios TR 05 y TR 07 (Zhou, 2009).

a)



b)

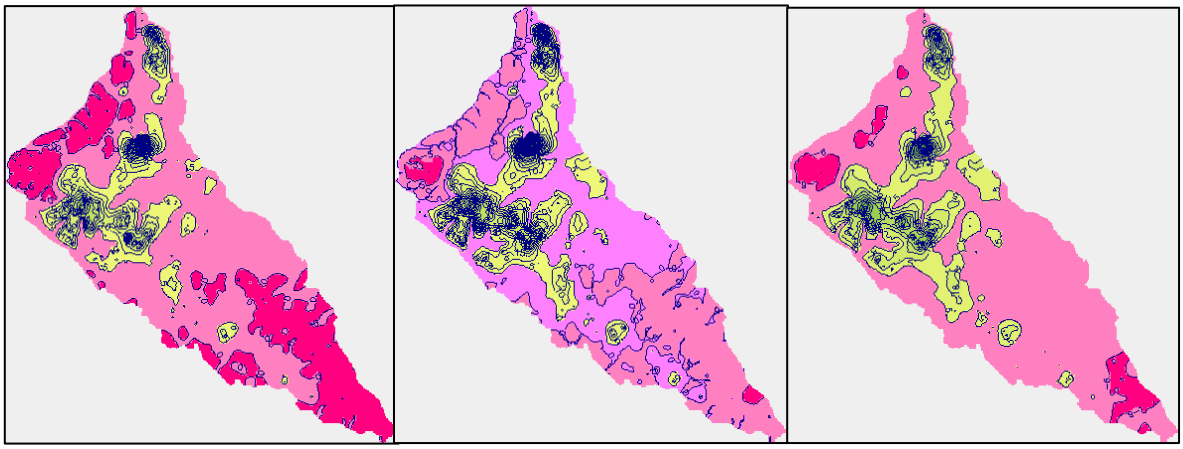


Figura 7. a) Descenso del nivel de agua subterránea para los años 2010, 2020 y 2030, escenario TR 05; b) Descenso de nivel de agua subterránea para los años 2010, 2020 y 2030, escenario TR 08. (Las zonas en rosa claro indican que se mantuvo el nivel de agua subterránea con respecto al nivel correspondiente al estado estacionario; zonas en rosa oscuro indican aumento de nivel).

Referencias

Bredehoeft, J. (1997). Safe yield and the water budget myth. *Ground Water, 6* (35), 929-930.

Chiang, W. (2001). *3D-groundwater modeling with PMWIN* (Vol. 346). Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag.

Foster, S. S., Morris, B., & Chilton, P. (1999). *Groundwater in urban development-a review of linkages and concerns.* IAHS Publication.

Kruse, E., Carol, E., Mancuso, M., Laurencena, P., Deluchi, M., & Rojo, A. (2013). Recharge assessment in an urban area: a case study of La Plata, Argentina. *Hydrogeology Journal, 21*(5), 1091-1100.

PMSAS, & SEAM. (2016). *Acuífero Patiño. Estudio de las variaciones de nivel estático y calidad. Presentación realizada por Geól. Daniel García en FACEN-UNA.*

Sanford, W. (2002). Recharge and groundwater models: an overview. *Hydrogeology journal, 10*(1), 110-120.

Theis, C. V. (1940). The source of water derived from wells. *Civil Engineering, 10*(5), 277-280.

Zhou, Y. (2009). A critical review of groundwater budget myth, safe yield and sustainability. *Journal of Hydrology, 1*(370), 207-213.