Proyecto 14 INV-190 **PRODUCTO 2**

INFORME: Modelamiento del Acuífero Patiño con PMWIN – Simulaciones en estado transitorio, considerando el periodo desde 1985 hasta 2016

Verónica Rojas Scheffer, M.Sc.

Contenido

1. Introducción 1
2. Método 2
2.1 Distintos escenarios asumidos 2
2.1.1 Extracción de agua subterránea 2
2.1.2 Recarga 4
2.2 Indicadores de sostenibilidad 4
3. Resultados 5

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 balance hídrico y el transporte de contaminantes en el 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.

Este informe presenta los resultados obtenidos de distintas simulaciones, realizadas considerando un periodo de tiempo de 31 años (desde 1985 hasta 2016), y variando las condiciones de extracción (cantidad de horas de bombeo por día consideradas, o tasa de extracción asignada a pozos sin dato de tasa de extracción). Las condiciones de recarga se mantuvieron constantes para este conjunto de simulaciones.

Para las simulaciones mencionadas, se mantuvieron los mismos parámetros de entrada independientes del tiempo presentados en el informe anterior (para ambos modelos: en estado estacionario y en estado transitorio), como conductividad hidráulica, rendimiento específico, fondo y tope de capas, y condiciones de borde. 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.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en cuatro simulaciones en estado transitorio, realizadas manteniendo constante la recarga (que fue calibrada en el estado estacionario), y asumiendo distintas condiciones para:

- Valor asumido para la tasa de extracción para los pozos en los que se conoce ubicación, pero no tasa de extracción, y
- forma de crecimiento de la tasa de extracción entre el año 2007 (último año con estos datos), y el año 2016.

La calibración para el modelo en estado transitorio se realizó calibrando el parámetro rendimiento específico (*Specific Yield*) del acuífero – que se define como el volumen de agua que un acuífero no confinado libera desde el espacio poroso por unidad de área y por unidad de descenso de su nivel (Bear & Verruijt, 2012)-, según se reportó en el informe anterior.

2. Método

2.1 Distintos escenarios asumidos

Se describen a continuación las condiciones consideradas para cuatro escenarios simulados en estado transitorio. Los parámetros de entrada independientes del tiempo presentados en el informe anterior fueron aplicados en estas simulaciones, y no se describen en detalle en el presente informe.

En la Tabla 1 se presenta un resumen de las condiciones asumidas para dichos escenarios, que serán detalladas a continuación.

2.1.1 Extracción de agua subterránea

Como ya fue mencionado anteriormente, no se cuenta con datos de caudal de bombeo y año de registro para todos los pozos de la base de datos consolidada (ver Informe 1- 2017). En el informe anterior se detalló la cantidad de datos con los que se cuenta en cuanto a coordenadas de ubicación, año de registro y tasa de extracción.

Dichos datos de pozos de extracción (que fueron obtenidos de distintas fuentes y luego reunidos en una base de datos consolidada) indican que hay registro de pozos de extracción (para uso doméstico, industrial y de distribución pública de agua) dese 1938 hasta 2007. El caudal medio de los pozos de extracción en el área del acuífero es de 18.17 m^3/h, y la moda para los datos de caudal existentes es de 12.00 m^3/h.

Como situación inicial para las simulaciones en estado transitorio, se asumió el resultado de la simulación en estado estacionario, considerando el año 1985 como año de inicio. Para el estado estacionario se consideró la extracción por medio de 513 pozos, cuyos datos de ubicación y tasa de extracción eran conocidos (base de datos de ERSSAN). Se asumió que, en dicho año, el sistema aún puede considerarse estable -es decir, que las entradas al sistema equivalen a las salidas, sin disminuir el almacenamiento del acuífero- para dichas condiciones de extracción.

Para las simulaciones en estado transitorio, se consideró la extracción por medio de 3550 pozos cuya ubicación es conocida, asumiendo un aumento lineal de la tasa de extracción, tomado proporcionalmente al aumento en la cantidad de pozos según la base de datos consolidada (Ver Tabla 1).

Como no se tienen datos de la cantidad de horas de bombeo por día, se tomó 24 h/día como peor caso, y 12 h/día como mejor caso. La alternativa en la cual se consideró 20 h/día se basó en una estimación realizada por funcionarios de ERSSAN (Ing. Harry Guth, Director de Regulación Técnica del Ente Regulador de Servicios Sanitarios del Paraguay, comunicación personal, 1/02/2017).

Tabla 1. Comparación entre cuatro simulaciones realizadas en estado transitorio, variando la cantidad de horas de bombeo por día, y el valor de tasa de extracción asignado a los pozos sin dato

Parámetro	*Escenario 1*	*Escenario 2*	*Escenario 3*	*Escenario 4*
Cantidad de horas de bombeo/ día	24	12	24	20
Tasa de extracción asignada a pozos sin dato (m^3/h)	18.17	18.17	12.00	12.00
Extracción total 1985 (Mm^3/año)	132.6	66.3	103.94	86.62
Extracción total 2007 (Mm^3/año)	525.73	276.2	531.87	448.18
Variación de tasa de extracción entre 1985 y 2016	Aumenta linealmente hasta 2007, luego cte.	Aumenta linealmente hasta 2007, luego cte.	Aumenta linealmente hasta 2016	Aumenta linealmente hasta 2016
Recarga total (Mm^3/año)[1]	184.6	184.6	184.6	184.6
Referencia para validación	NE 2007	NE 2007	NE 2007	NE 2007
Coeficiente de correlación, pre-calibración	0.700	0.807	0.773	0.795
Coeficiente de correlación, post-calibración	--	0.811	0.779	0.800

Fuente: Elaboración propia, más datos adaptados de Tabla 4, Informe 1 – 2017

[1] Correspondiente a la recarga calibrada por zonas, en el modelo en estado estacionario.

2.1.2 Recarga

La recarga asumida para todos los escenarios presentados se consideró constante e igual a la recarga obtenida a través de calibración en el modelo estacionario, para la cual se consideraron 6 regiones con tasas de recarga diferentes.

La recarga inicial para las 6 regiones en el modelo estacionario se basó en la investigación de Báez, Villalba y Nogués (2014). Se tuvo en cuenta una recarga natural o por precipitaciones, que fue estimada con base en el promedio de precipitaciones en el área del estudio en el período 1970 a 2009, considerando un 9% de infiltración (Monte Domecq & Báez, 2007). Además, se incluyó una recarga artificial estimada con base en el uso de la tierra y datos del excedente entre distribución y facturación de agua potable de la ESSAP en el año 2011 (Dirección General de Estadísticas, 2012).

2.2 Indicadores de sostenibilidad

Para definir una línea de base a la cual hacer referencia cuando evaluamos los cambios sufridos por las entradas y salidas del acuífero, se tuvieron en cuenta las condiciones de recarga, extracción por bombeo, y entradas y salidas desde/hacia cursos de agua superficiales en el estado estacionario.

Además, se seleccionaron elementos del balance hídrico del acuífero para evaluar su variación en los distintos escenarios, utilizándolos como indicadores de la sostenibilidad del aprovechamiento para los distintos casos.

Según Zhou (2009), la tasa de extracción sostenible debe satisfacer las siguientes condiciones:

- Tasa de bombeo sostenible, definida por la ecuación del balance hídrico;
- Restricciones ambientales: agotamiento de aguas superficiales, reducción de descarga de agua subterránea a ríos y humedales, intrusión de agua de calidad no deseada, hundimiento, daño a ecosistemas dependientes.
- Restricciones económicas: profundidad del cono de depresión y costo de bombeo viable.
- Restricciones sociales: acceso seguro a agua de buena calidad para consumo humano, distribución equitativa del recurso (Zhou, 2009).

Es oportuno indicar que se realizó la suposición de que los 3550 pozos se encuentran en funcionamiento desde el inicio de las simulaciones en estado transitorio. Las tasas iniciales de extracción son bajas para 2/3 del total de pozos (los pozos originalmente sin dato de tasa de extracción); durante el primer año de simulación cada uno de dichos pozos extrae entre 43.2 y 87.2 m^3/día, dependiendo del escenario. Además, la tasa total de extracción inicial es similar a tasa total de extracción del estado estacionario (76 Mm^3/año para el estado estacionario, comparar con datos de la Tabla 1). Esta consideración podría influir en resultados puntuales de la simulación (como la disminución de nivel obtenida para algunos pozos de observación), debido a la dependencia de la respuesta dinámica de un acuífero a la extracción por bombeo, con respecto a la distancia entre los pozos de bombeo y las zonas de recarga y de descarga (Zhou, 2009; Bredehoeft, 1997).

En la Tabla 2 se muestran los indicadores de sostenibilidad del aprovechamiento seleccionados, y los valores de línea de base obtenidos de la simulación en estado estacionario.

Tabla 2. Indicadores de sostenibilidad y valores de referencia obtenidos a través de simulación en estado estacionario.

Ámbito	***Restricción***	***Estado estacionario (1985)***	
Ec. Balance Hídrico	P_d (tasa máxima de bombeo) ≤ R_0	P (tasa de bombeo) = 76	(Mm^3/año)
	R_0 (recarga)	184.55	(Mm^3/año)
Ambiental	Descarga residual a cursos de agua superficial	277.8	(Mm^3/año)
	Recarga inducida desde cursos de agua superficial	169.3	(Mm^3/año)
Económico	Descenso máximo de NE (en pozos de observación)	Referencia para comparar con resultados de estado transitorio	(m)
Social	Calidad aceptable para consumo humano	Valores máximos de concentración de contaminantes en estado estacionario*	

*A ser obtenidos en simulaciones de transporte de contaminantes.

Fuente: Elaboración propia

3. Resultados

A continuación, se presentan algunos resultados obtenidos a partir de los distintos escenarios simulados en el estado transitorio. La Tabla 3 resume los resultados de las simulaciones para el año 2016, comparándolos además con la línea de base.

Tabla 3. Resultados obtenidos de simulaciones en estado transitorio, para el año 2016.

Restricción	***Estado estacionario (1985)***		*Escenario 1 (2016)*		*Escenario 2 (2016)*		*Escenario 3 (2016)*		*Escenario 4 (2016)*	
P tasa de bombeo	76	(Mm3/año)	525.73	(Mm3/año) 285% de la recarga	276.2	(Mm3/año) 150% de la recarga	531.87	(Mm3/año) 288% de la recarga	448.18	(Mm3/año) 243% de la recarga
Recarga (natural + antrópica)	184.55 (Mm3/año)									
Descarga residual a cursos de agua superficial	277.8	(Mm3/año)	177.37	64% del estado estacionario	267.78	96% del estado estacionario	185.52	67% del estado estacionario	197.77	71% del estado estacionario
Recarga inducida desde cursos de agua superficial	169.3	(Mm3/año)	462.4	273% del estado estacionario	328.96	194% del estado estacionario	412.26	244% del estado estacionario	359.1	212% del estado estacionario
Descenso máximo de NE (en pozos de observación)	(ref.)	(m)	- 66	(m)	- 30	(m)	- 46.8	(m)	- 38.4	(m)
Promedio de descenso de NE	(ref.)	(m)	-11.74	(m)	-4.97	(m)	-9.04	(m)	-7.29	(m)
Desvío estándar	(ref.)	(m)	15.22	(m)	7.15	(m)	-10.93	(m)	9.03	(m)

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 3 puede observarse que, para todos los escenarios, la recarga inducida desde cursos de agua superficial es superior a la recarga inducida en la situación considerada de equilibrio para el acuífero. La descarga residual hacia los cursos de agua disminuye en todos los casos, aunque con poca variación porcentual en el Escenario 2. El descenso en el nivel estático resultante de todas las simulaciones es grande.

Referencias

Báez, L., Villalba, C., & Nogués, J. (2014). *Mapeo de la Vulnerabilidad y Riesgo de Contaminación del Agua Subterránea del Gran Asunción.* Facultad Politécnica, Universidad Nacional de Asunción. Proyecto INV 20, CONACYT.

Bear, J., & Verruijt, A. (2012). *Modeling groundwater flow and pollution* (Vol. 2). Springer Science and Bussiness Media.

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

Dirección General de Estadísticas, E. y. (2012). *Compendio Estadístico Ambiental del Paraguay - Año 2011.* Asunción, Paraguay.

Monte Domecq, R., & Báez, J. (2007). *Estudio de políticas y manejo ambiental de aguas subterráneas en el área metropolitana de Asunción (Acuífero Patiño). Informe técnico 2.11. Balance hídrico del Acuífero Patiño.* Hidrocontrol S.A. Cooperación Técnica ATN/JC- 8228 - PR - SENASA -BID.

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