

Turbidez y sólidos en suspensión de las aguas de escorrentía susceptibles de ser utilizadas en la recarga artificial del acuífero granular profundo subyacente a la ciudad de San Luis de Potosí (México)

J. M. Murillo

Instituto Geológico y Minero de España c/ Ríos Rosas 23. 28003. Madrid. España.
jm.murillo@igme.es

RESUMEN

En el presente artículo se analiza la turbidez y el contenido de sólidos en suspensión de las aguas de escorrentía susceptibles de utilizarse en la recarga artificial del acuífero granular profundo de San Luis de Potosí. La operación de recarga artificial que se ha programado en este acuífero pertenece a la modalidad denominada almacenamiento subterráneo con recuperación (ASR). En el artículo se presentan una serie de ecuaciones que correlacionan los sólidos en suspensión con la turbidez y la validez de las mismas. También se hace referencia al máximo contenido de sólidos en suspensión que pueden admitir las instalaciones de recarga artificial del tipo ASR. En el análisis realizado se ha podido comprobar que la turbidez varía con el tiempo de acuerdo a una función exponencial del tipo decreciente, que contempla tanto la deposición de partículas que sedimentan exclusivamente por efecto de la gravedad, como por la acción de determinados mecanismos que favorecen la coagulación y floculación natural de las partículas coloidales. Dado que las instalaciones de recarga artificial de tipo ASR exigen unos condicionantes muy rigurosos, por lo que respecta al contenido máximo de sólidos en suspensión, el análisis también se ha realizado para instalaciones de tipo superficial como las balsas de infiltración.

Palabras clave: almacenamiento subterráneo con recuperación (ASR), recarga artificial, sólidos en suspensión, turbidez

Turbidity and suspended solids in the runoff susceptible of use for the artificial recharge of the deep granular aquifer subjacent to the town of San Luis de Potosí (Mexico)

ABSTRACT

This article presents an analysis of the turbidity and solid contents in suspension of the runoff that might be used for artificially recharging a deep granular aquifer located by San Luis de Potosí. The programmed artificial recharge operation corresponds to a type known as Aquifer Storage and Recovery (ASR). A series of equations to correlate the solids in suspension with turbidity and its validity are put forth. Reference is also made to the maximum content in suspended solids that operations of ASR-type recharge can assume. Through this analysis, we were able to corroborate that turbidity varies over time according to an exponential function of the decreasing type, which accounts both for the deposition of particles that sediment exclusively due to the effect of gravity, and the action of certain mechanisms that favour coagulation and the natural flocculation of colloidal particles. Given that the operations of artificial recharge by means of ASR require very rigorous conditions, in terms of the maximum contents of solids in suspension, the analysis has also been carried out for surface installations such as infiltration ponds.

Key words: aquifer storage and recovery (ASR), artificial recharge, suspended solids, turbidity

Introducción

La recarga artificial de acuíferos es una de las técnicas hidrogeológicas que se vienen barajado, como una posible solución, para paliar parte de los problemas de sobreexplotación que aquejan al acuífero profundo granular subyacente a la ciudad de San Luis de Potosí (CNA, 2006).

Dicho acuífero (Figura 1) está constituido por materiales volcánicos y sedimentarios de origen con-

tinental, que se encuentran semiconfinados por una capa de arena fina y arcillosa que presenta una conductividad hidráulica de 10^{-9} m/s (Carrillo, 1992). Los materiales permeables alcanzan un espesor que varía entre 100 m y 400 m (Martínez Ruiz, 1997). El acuífero lo conforman gravas, arenas, limos y arcillas (Martínez y Aguirre, 1987). Su recarga natural, que es en gran parte regional, proviene de la percolación del acuífero superior a través del paquete semipermeable que lo semiconfina y de las riolitas fracturadas

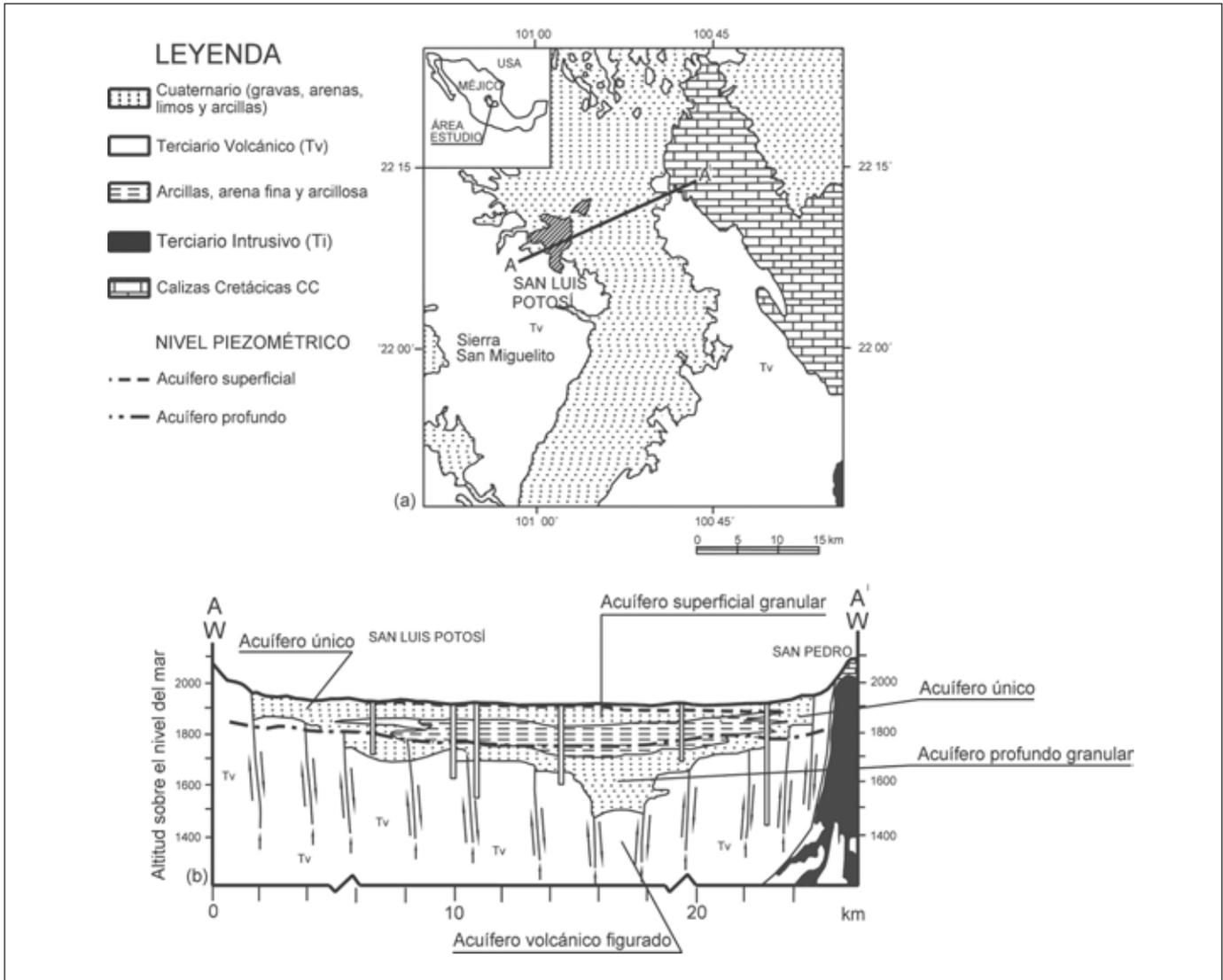


Figura 1. Mapa de situación de la zona de estudio y corte esquemático del acuífero de San Luis de Potosí. Modificado de Carrillo-Rivera et al. 1996

Figure 1. Map of the situation of the study area and schematic cross-section of the San Luis de Potosí aquifer. Elaborated following Carrillo-Rivera et al. 1996

que afloran en la Sierra de San Miguelito. El acuífero se explota mediante sondeos que alcanzan profundidades comprendidas entre 200 m y 300 m, y el nivel estático se sitúa entre 85 m y 160 m (CNA, 2004). El caudal medio de estos sondeos es de 25 L/s y la calidad del agua apta para cualquier tipo de consumo (Cardona, 2007).

La intensa sobreexplotación a que se encuentra sometido el acuífero ha provocado un abatimiento del nivel piezométrico en los últimos 28 años de hasta 55 metros, así como una fuerte distorsión de la red de flujo, que en la actualidad es de tipo radial con líneas

de corriente que tienden a concentrarse en el interior del núcleo urbano de San Luis de Potosí (CNA, 2004). El uso intensivo, que se ha hecho de las aguas subterráneas en este acuífero, ha modificado el valor del gradiente hidráulico, que en algunos sectores de la ciudad llega a ser del dos por ciento (CNA, 2006). La conductividad hidráulica es de 10^{-4} m/s (Carrillo, 1992) y la transmisividad varía entre 17 m²/d y 700 m²/d (Martínez Hernández, 1996).

El agua con la que se prevé realizar la operación de recarga artificial procederá de los excedentes del río Santiago, que no son regulados en la presa de San

José. Ésta se localiza sobre el propio río Santiago y tiene una capacidad de almacenamiento de aproximadamente 5 millones de metros cúbicos. En la cuenca de este río se han construido otras dos presas (El Peaje y El Potosino), que se ubican aguas arriba de la anterior. La presa de El Peaje embalsa aproximadamente 6 millones de metros cúbicos y se localiza en el arroyo Grande o Azul. La presa El Potosino tiene una capacidad de 760000 metros cúbicos y debe su nombre al arroyo que regula. El agua que se almacena en estos tres embalses se destina al abastecimiento urbano de San Luis de Potosí tras un tratamiento en la planta potabilizadora de los Filtros (Figura 2).

El dispositivo de recarga lo constituirán 8 pozos de ASR con una capacidad de infiltración de 200 L/s (CNA, 2004). La técnica del ASR es en ocasiones muy sensible a la colmatación (Pyne, 1995), por lo que para evaluar la viabilidad de una operación de recarga artificial de este tipo se precisa saber la cantidad de sólidos en suspensión que contiene el agua que se pretende introducir en el acuífero, así como su variabilidad temporal. Éstos son datos que normalmente no se conocen, ya que el parámetro que generalmente se mide es la turbidez. Ésta no guarda equivalencia directa con el contenido en sólidos en suspensión (Truhlar, 1978) y, según algunos autores (Pyne, 1995),

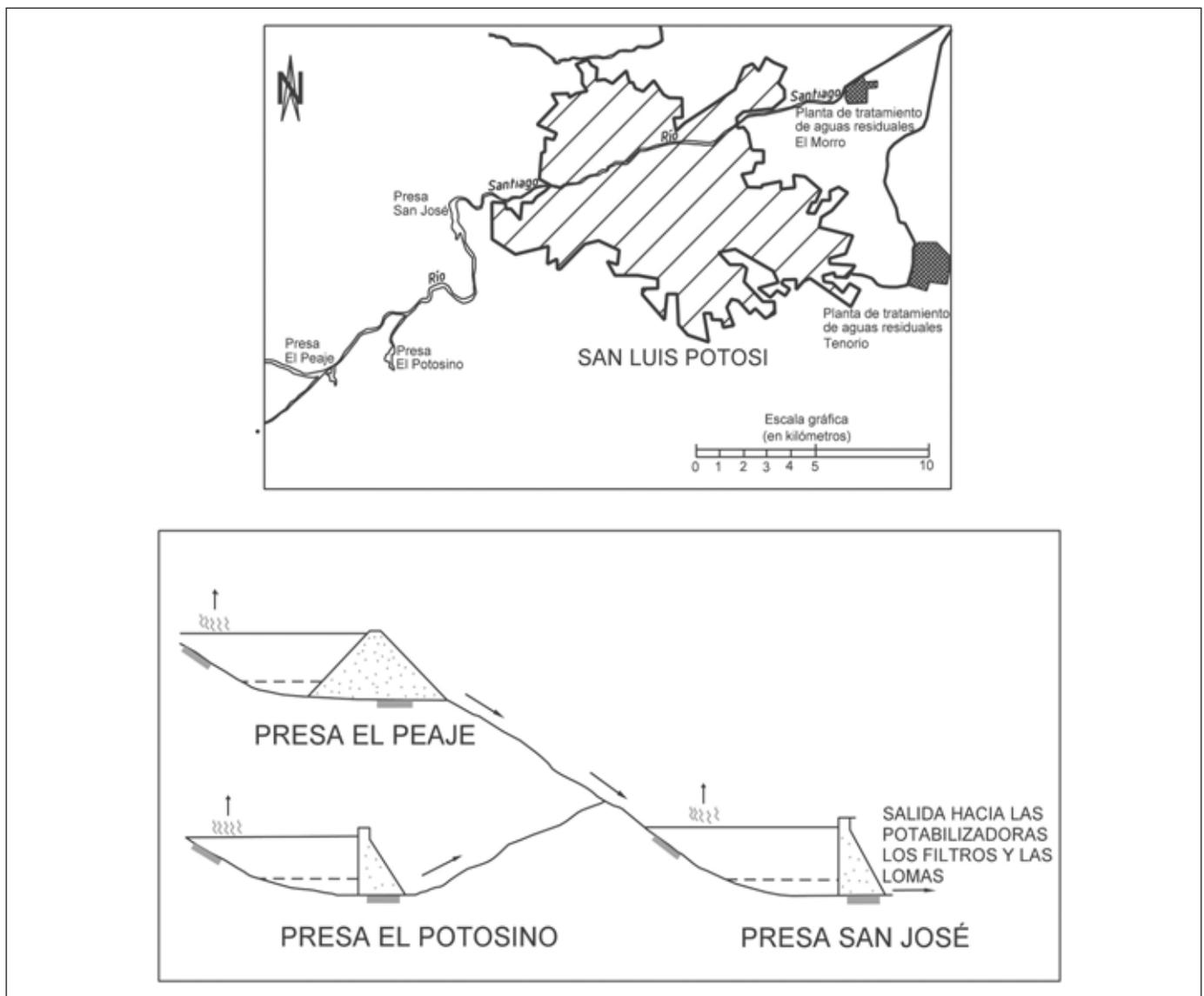


Figura 2. Mapa de situación de los elementos que determinan el sistema de regulación superficial. Elaborado a partir de CNA, 2006
Figure 2. Map of the situation of elements determining the system of surface regulation. Elaborated following CNA, 2006

no suele ser un buen indicador de los primeros. No obstante, para cada caso concreto, existe la posibilidad de proceder a su correlación, que normalmente es buena para un mismo punto de un río o arroyo, ya que la materia en suspensión es una característica intrínseca de cada cuenca (Truhlar, 1978).

La razón por la que se mide la turbidez, que es un procedimiento indirecto, se debe a la imposibilidad de determinar en continuo los sólidos en suspensión, que se presentan en cada una de las operaciones que se realizan en las plantas de tratamiento de aguas residuales y en las de potabilización de agua para abastecimiento urbano. La misma argumentación es válida para el caso particular de una instalación de recarga artificial de acuíferos.

La turbidez, que la causan tanto partículas coloidales como insolubles de mayor tamaño, se determina mediante el método de luz dispersa, que tiene su fundamento en el efecto que se denomina absorción. Así, cuando un haz de luz visible atraviesa un sistema, que contiene partículas dispersas, la intensidad del haz disminuye, ya que una parte del mismo se transforma en otras formas de energía. La relación entre la luz que entra y la luz que sale es el valor de la turbidez, por lo que este parámetro es una medida orientativa de la carga de sólidos presentes en un determinado fluido, mientras que los sólidos en suspensión son una medida cuantitativa, ya que se determinan mediante filtración y pesado.

Objetivo

El análisis de la viabilidad técnica de un proyecto de recarga artificial de acuíferos requiere de la realización de dos tipos de estudios. Uno hace referencia a la caracterización hidrogeológica del acuífero a recargar al objeto de evaluar la aptitud e idoneidad que presenta el acuífero ante la operación de recarga artificial. El otro se circunscribe a la cuantificación y caracterización del agua que se puede emplear en la operación de recarga artificial. Este segundo estudio contempla a su vez la realización de las siguientes actividades:

- Identificación y cuantificación espacio-temporal de los volúmenes de agua que son susceptibles de recargar artificialmente.
- Evaluación de las características físicas y químicas del agua de recarga y del agua del acuífero.

La primera actividad hace referencia a la disponibilidad de agua, ya que si ésta es insuficiente, o tiene una distribución temporal que se circunscribe a períodos cortos y concretos caracterizados por grandes aportaciones, el proyecto puede estar condenado al

fracaso, o bien precisar de la construcción de infraestructuras anexas a las instalaciones de recarga artificial, que almacenen y regularicen la escorrentía superficial, que posteriormente alimentará al acuífero. Estas instalaciones pueden llegar a tener una gran envergadura, por lo que el proyecto podría no ser económicamente viable.

La segunda actividad contempla estudios sobre los siguientes aspectos:

- Compatibilidad entre el agua de recarga y el agua del acuífero en orden a evitar reacciones químicas que reduzcan la permeabilidad del embalse subterráneo. Este mismo objetivo también requiere que se analice la afinidad que existe entre el agua de recarga y los materiales que constituyen el acuífero.
- Carga de sedimentos (turbidez) del agua de recarga, que debe ser baja, ya que los materiales de tamaño muy fino colmatan no sólo la instalación de recarga, sino también los tramos del acuífero en contacto con la misma.

A este respecto cabe indicar que no existe un valor límite de turbidez o de sólidos en suspensión que tenga carácter universal, ya que un agua puede tener una calidad apropiada para ser infiltrada a través de un determinado tipo de instalación de recarga artificial y en cambio ser completamente inadecuada para otra. Lo mismo ocurre con el acuífero receptor. A este respecto los acuíferos calizos suelen admitir un agua con un mayor contenido en sólidos en suspensión que los detríticos.

El objeto del presente artículo es el análisis de la turbidez que presentan las aguas de escorrentía susceptibles de ser utilizadas en la recarga artificial del acuífero granular profundo, que subyace a la ciudad de San Luís de Potosí (México), así como realizar una primera estimación del contenido en sólidos en suspensión del agua que se pretende recargar.

Metodología

Para saber si los sólidos en suspensión que contiene el agua a recargar, se encuentran dentro de los límites que permiten un correcto funcionamiento de una instalación de recarga artificial de tipo ASR, se ha consultado un trabajo realizado por la Universidad de Florida (Brown *et al*, 2006), que analiza datos correspondientes a diversas experiencias de ASR (Tabla 1).

En dicha tabla se muestran los datos de diecisiete experiencias de ASR analizadas por la Universidad de Florida. Éstos hacen referencia a la litología, transmisividad, grado de colmatación que tiene lugar en los pozos de recarga, causa de la misma y contenido en

Localización de la instalación	Litología	Transmisividad del acuífero m ² /d	Sólidos en suspensión en el agua de recarga TSS mg/l	Problemas de Colmatación	Causa
Highline (Seattle)	Arenas y gravas	277	1,00 a 4,00	Si	Presencia de algas en el agua de recarga
Clumbia South Shore (Portland)	Arenas y gravas	251	1,00 a 1,67	Importantes	En fase de investigación
Beaverton (Oregón)	Basaltos	1242	1,00 a 10,00	No	Regularmente el pozo se limpia y desarrolla mediante un programa de bombeo.
Salem (Oregon)	Basaltos	2973	0,30 a 1,00	No	Regularmente el pozo se limpia y desarrolla mediante un programa de bombeo.
S.E. Salt Lake City (Utah)	Arenas y gravas	460	<1	Ligeros	Presencia de algas en el agua de recarga
Calleguas (California)	Arenas	929	1,00 a 3,00	Si	Sólidos en suspensión y entrada de aire en el pozo de recarga
Las Vegas (Nevada)	Arenas y gravas	2.349	<1	Si	Entrada de aire en el pozo de recarga
Antelope Valley (California)	Arenas y gravas	232	1,00 a 1,67	Ligeros	Crecimiento bacteriológico
Highlands Ranch (Denver)	Areniscas	93	1,00 a 2,00	Intermedios	Sólidos en suspensión, baja transmisividad del acuífero y entrada de aire en el pozo de recarga
Denver Basin Demo (South Denver)	Areniscas	79	<1	No	Regularmente el pozo se limpia y desarrolla mediante un programa de bombeo.
Alamogordo (New Mexico)	Arenas y gravas	232	<1	Ligeros	Precipitados de hierro
Greenbay (Wisconsin)	Areniscas y calizas	102	<1	Ligeros	Sólidos en suspensión
Oak Creek (Wisconsin)	Areniscas	305	<1	Ligeros	Sólidos en suspensión
Hilton Head Island (South Carolina)	Calizas	3530	1,00 a 2,00	Si	Problemas hidráulicos
Myrtle Beach (South Carolina)	Arenas	149	1,00 a 1,50	Ligeros	Sólidos en suspensión y crecimiento bacteriológico
Wildwood	Arenas	1078	<1	Ligeros	Formación y precipitación de hidróxido de hierro
Lychett Minster (England)	Creta	200	<1	Ligeros	Presencia de fluor en el agua de recarga y precipitación de fluorita.

Tabla 1. Datos de diecisiete experiencias de ASR analizadas por la Universidad de Florida. Elaborado a partir de Brown et al, 2006
Table 1. Dates analyzed by the University of Florida in seventeen ASR plants. Elaborated following Brown et al., 2006

sólidos en suspensión que lleva el agua que se emplea en la operación de ASR.

Las actuaciones que se listan en la tabla 1 responden tanto a instalaciones de tipo experimental, diseñadas únicamente con fines de investigación, como a dispositivos de tipo industrial, construidos con el objeto de introducir y almacenar agua en los acuíferos, durante los periodos excedentarios, y extraerla, bien para abastecimiento urbano o bien para agricultura, en las épocas en que existe déficit.

Los embalses subterráneos que se listan en dicha tabla son mayoritariamente de tipo granular y en menor proporción de naturaleza fisurada (setenta y seis por ciento frente al veinticuatro por ciento). Presentan una litología variada en la que predominan las arenas y gravas (treinta y cinco por ciento), seguida de las areniscas (veintitrés por ciento), arenas (dieciocho por ciento), basaltos (doce por ciento) y rocas calcáreas (doce por ciento). La mayor parte de estos acuíferos poseen un régimen hidráulico con un fun-

cionamiento mixto en el que se alternan sectores libres y confinados. La transmisividad es inferior a 100 m²/d únicamente en dos acuíferos; está comprendida entre 100 m²/d y 500 m²/d en nueve; y es superior a 500 m²/d en los seis restantes.

En casi todas las instalaciones el agua que se recarga se ha tratado previamente en una planta potabilizadora. En menor medida se introduce agua residual que ha sufrido un tratamiento terciario, generalmente complementado con microfiltración, ósmosis inversa y radiación ultravioleta, y en un reducido número de instalaciones agua de tormenta previamente decantada.

El contenido en sólidos en suspensión del agua de recarga en más del cincuenta por ciento de las instalaciones que se muestran en la tabla 1 es igual o inferior a 1mg/L. En un treinta por ciento está comprendido entre 1 mg/L y 2 mg/L, y en algo menos del veinte por ciento el límite inferior es de 1 mg/L, pero el superior se encuentra por encima de los 2 mg/L. La cifra de 1 mg/L se debe a que se ha comprobado que contenidos en sólidos en suspensión de tan sólo 2

mg/L reducen significativamente la tasa de recarga de muchos pozos (Pyne, 1995). De hecho, en la tabla 1 se observa que, aunque el contenido en sólidos en suspensión sea inferior a 1 mg/L, se detectan ligeros problemas de colmatación, siempre que no se somete el pozo de recarga a un programa de limpieza y desarrollo mediante bombeo. No obstante, en terrenos fisurados con una alta permeabilidad, como los basaltos de Beaverton (Oregón), es posible introducir agua con un contenido en sólidos en suspensión de hasta 10 mg/L. En Bolivar, acuífero calizo que se localiza en el sur de Australia, se han obtenido unos excelentes resultados trabajando con una turbidez máxima de admisión inferior a 3 NTU (Pavelic *et al.*, 2007). Estos resultados seguramente se deban más a la naturaleza y tipología de los acuíferos, que a la aplicación de un programa de limpieza y desarrollo en los pozos de recarga.

En el presente artículo también se han consultado una serie de trabajos (Packman *et al.*, 1999; Lewis *et al.*, 2002; Holliday *et al.*, 2003; Marquis, 2005; Randerson *et al.*, 2005; Fenton, 2006), que han puesto

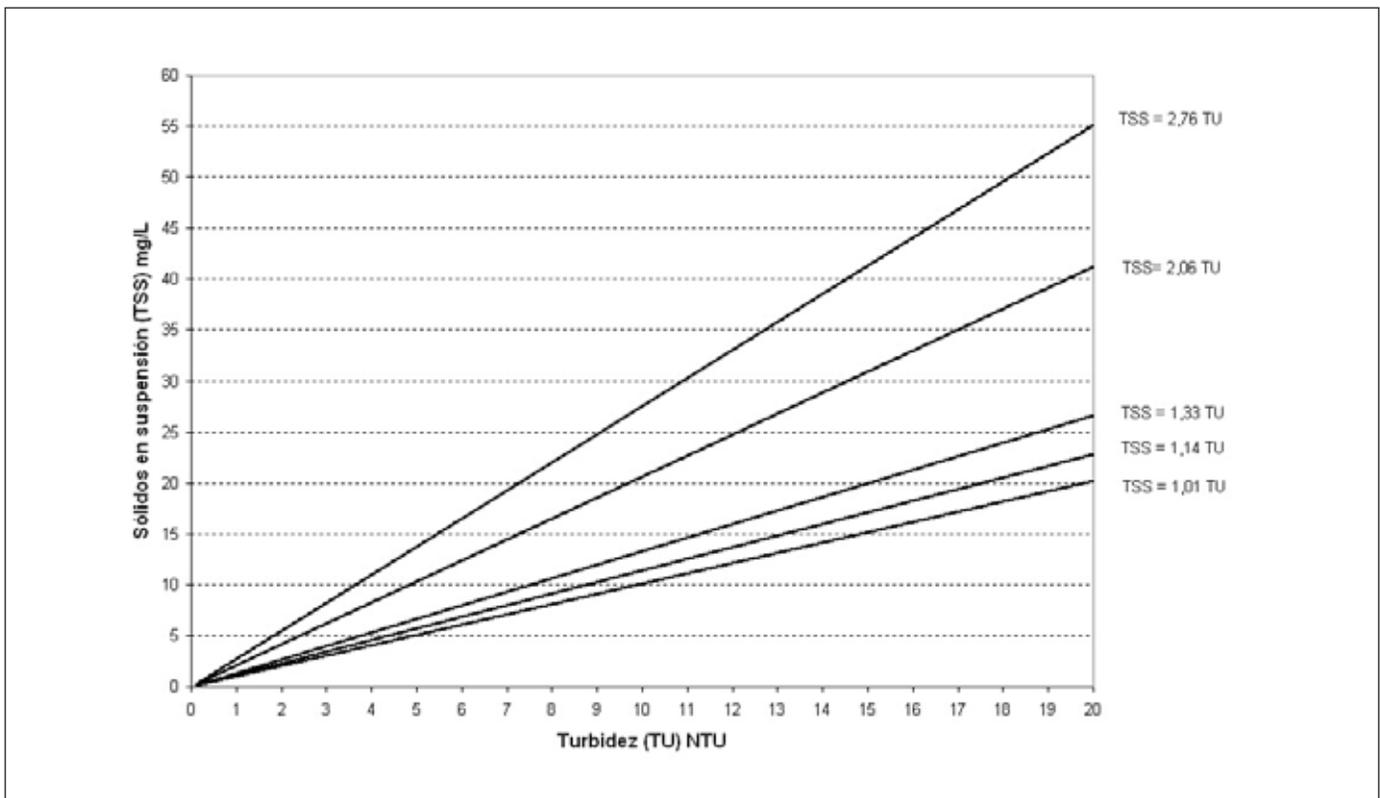


Figura 3. Correlación encontrada entre los sólidos en suspensión (TSS) y la turbidez (TU) en los trabajos realizados por Packman *et al.*, 1999; Lewis *et al.*, 2002; Holliday *et al.*, 2003; Marquis, 2005 y Randerson *et al.*, 2005

Figure 3. Correlation found between total suspended solids (TSS) and turbidity (TU) in the work of Packman *et al.*, 1999; Lewis *et al.*, 2002; Holliday *et al.*, 2003; Marquis, 2005 and Randerson *et al.*, 2005

de manifiesto que entre sólidos en suspensión (TSS) y turbidez (TU) existe una correlación de tipo lineal, aunque la ecuación que liga ambos factores en cada uno de los estudio analizados es diferente. Holliday *et al.* (2003) advierte que no se trata exactamente de una correlación de tipo lineal, sino potencial ($TU=aTSS^b$), pero con un exponente "b" que es aproximadamente igual a la unidad.

En los trabajos anteriormente mencionados se observa (Figura 3) que, siempre que la turbidez es baja o muy baja, el contenido en sólidos en suspensión es reducido, aunque ligeramente superior al valor que toma la turbidez, pero sin diferir mucho de ésta. Sin embargo, cuando el valor de la turbidez es alto o muy alto, la discrepancia entre uno y otro factor es muy elevada.

De la figura 3 se deduce que, para un valor de turbidez de 5 NTU, los sólidos en suspensión son de 5,05 mg/L, si se utiliza la ecuación $TSS = 1,01 TU$, y de 13,78 mg/L, si se emplea la expresión $TSS = 2,76 TU$. Esta última ecuación ofrece los resultados más desfavorables. En ambos casos el contenido en sólidos en suspensión es adecuado para una instalación de recarga artificial de tipo superficial, pero no resulta aceptable para sondeos de tipo ASR. En este tipo de instalaciones, dado que la cuantía recomendable de sólidos en suspensión parece ser de 1 mg/L (Brown *et al.*, 2006), el valor de turbidez según las ecuaciones que se muestran en la figura 3 tienen que ser inferior a 1 NTU, para que los sólidos en suspensión no superen en el peor de los casos el límite de 2 mg/L (Pyne, 1995). Este autor (Pyne 1995 en Pérez Paricio y Carrera, 1999) establece que el contenido en sólidos en suspensión del agua que se introduce en un pozo debe de ser menor de 2 mg/L si la conductividad hidráulica es mayor de 40 m/d y menor de 0,1 mg/L si ésta está comprendida entre 4 y 40 m/d.

Por lo que respecta a las instalaciones de recarga artificial de tipo superficial es admisible trabajar con un contenido en sólidos en suspensión mayor. Éste se fija en 10 mg/L (Pérez Paricio y Carrera, 1999), aunque estos autores no indican si dicho valor lo han obtenido experimentalmente o si se trata de un dato bibliográfico, pues en el trabajo consultado no se encuentra ninguna referencia a este respecto, salvo una breve alusión a unas instalaciones holandesas, que admiten hasta 20 mg/L, pero sin indicar la fuente de procedencia.

A este respecto, el autor del presente trabajo comprobó durante el seguimiento de la experiencia de recarga artificial del río Oja, que se realizó entre los años 1986 y 1989 (Murillo, 1994; Gavilán y Murillo, 1997), que las instalaciones funcionaban adecuadamente, cuando la entrada de sólidos en suspensión a

las balsas de recarga era inferior a 10 mg/L, mientras que se detectaba una deposición importante de sedimentos en la instalación de decantación y en el lecho de las balsas de infiltración cuando el contenido en sólidos en suspensión a la entrada de la balsa de sedimentación era superior a 80 mg/L.

En el presente trabajo, dado que no se tienen datos de sólidos en suspensión en el río Santiago aguas abajo de la presa de San José, aunque sí de turbidez en su canal de desembalse, se ha utilizado, para cuantificar el contenido de sólidos en suspensión en el agua susceptible de ser empleada en la operación de recarga artificial, las relaciones de correlación que se muestran en la figura 3, aún cuando esto supone un importante grado de incertidumbre e inexactitud, ya que la dispersión luminosa se ve afectada por el tamaño, la forma y el índice de refracción de las partículas en suspensión, que pueden ser muy diferentes de una a otra cuenca e incluso de uno a otro punto de un mismo río (Avedaño y Cobo, 1998).

La operativa utilizada sólo se ha concebido como una primera aproximación hasta que se puedan muestrear en campo los sólidos en suspensión. Esta tarea no es baladí, ya que los eventos con circulación de agua por el cauce del río Santiago aguas abajo de la presa de San José, que son los potencialmente utilizables en una hipotética operación de recarga artificial, no ocurren todos los años. En el periodo comprendido entre 1995 y 2004 únicamente tuvieron lugar en 1996, 1997, 1998, 1999, 2002 y 2004. Su duración fue respectivamente de cuatro, dos, quince, veintuno, cuarenta y veinticinco días (CNA, 2004).

Análisis y presentación de resultados

INTERAPAS, que es el organismo encargado de suministrar agua potable a la ciudad de San Luís de Potosí, ha proporcionado, para la realización de este trabajo, una serie de datos diarios de turbidez en el canal que lleva agua desde la presa de San José hasta la entrada de la potabilizadora de la planta de los Filtros. El periodo controlado abarca desde junio de 2006 hasta junio de 2007, pero la serie no se encuentra completa, ya que los fines de semana, los festivos y los periodos vacacionales de Semana Santa y mes de agosto (días 5 al 23) no se procedió a la determinación de esta variable. Para el año 2006 el número de medidas realizadas fue de 21 en junio, 19 en julio, 10 en agosto, 17 en septiembre, 21 en octubre, 19 en noviembre y 17 en diciembre; y para el año 2007 de 22 en enero, 18 en febrero, 21 en marzo, 17 en abril, 22 en mayo y 15 en junio, por lo que se efectuaron

242 determinaciones sobre un máximo de 395 eventos posibles, lo que representa que se determinó la turbidez para el 61 por ciento del periodo controlado.

En la Figura 4 se muestra una clasificación en orden creciente del valor que adquiere la variable turbidez en cada uno de los eventos de control que se han realizado. En la misma se puede observar un primer tramo, que abarca 23 determinaciones, donde la turbidez es inferior a 2,5 NTU. A este periodo le sigue un pequeño intervalo de 8 determinaciones con un valor de turbidez comprendido entre 2,5 NTU y 5 NTU. A continuación aparece un gran intervalo de creciente y suave pendiente ascendente, definido por 150 determinaciones, donde la turbidez se encuentra comprendida entre 5 NTU y 20 NTU. Este intervalo es susceptible de ser subdividido en otros dos (5 NTU a 7,5 NTU y 7,5 NTU a 20 NTU), que aproximadamente tienen igual tamaño (74 y 76 determinaciones). A partir de la determinación 181 se pueden definir otros dos intervalos (20 NTU a 60 NTU y 60 NTU a 120 NTU). El primero abarca hasta la determinación 228 y está constituido por 47 mediciones, mientras que el

segundo se prolonga hasta la determinación 242 y está constituido por 14 mediciones.

La norma oficial mexicana NOM-127-SSA1-1994 (DGSA, 1994) establece que el máximo de turbidez para aguas potables es de 5 unidades nefelométricas, por lo que de acuerdo a las determinaciones mostradas en la figura 4 sólo un 13 % de las mediciones realizadas presentan un agua con una turbidez adecuada para ser recargada directamente, ya que en principio no es recomendable introducir un agua en el acuífero de una calidad inferior al uso al que se destina (Custodio, 1986). La anterior apreciación es independiente de los condicionantes (contenido máximo de sólidos en suspensión) que se tengan que imponer al agua de recarga para evitar la colmatación de las instalaciones de infiltración, que se pretenden construir, que todavía pueden ser más restrictivos y rigurosos. Para el resto de las determinaciones (87 % de las mediciones realizadas) se precisaría someter el agua a un importante proceso de eliminación de sólidos en suspensión antes de proceder a recargarla en el acuífero.

En la figura 5 se ha representado, para el periodo

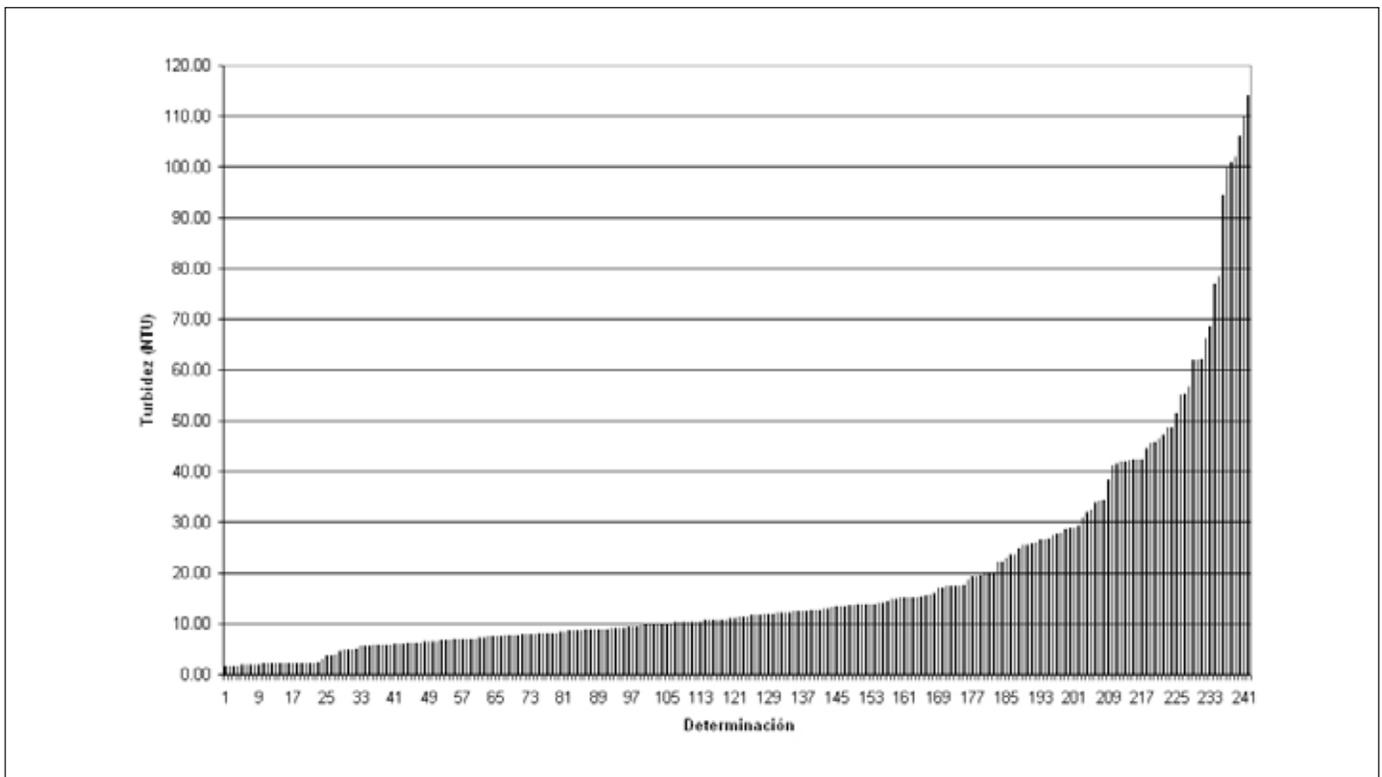


Figura 4. Clasificaciones en orden creciente del valor que adquiere la variable turbidez en cada uno de los eventos de control que se han realizado en el canal de salida del embalse de San José
Figure 4. Classifications in order of increasing value acquired by variable turbidity in each one of the control events carried out in the exit channel of the San José reservoir

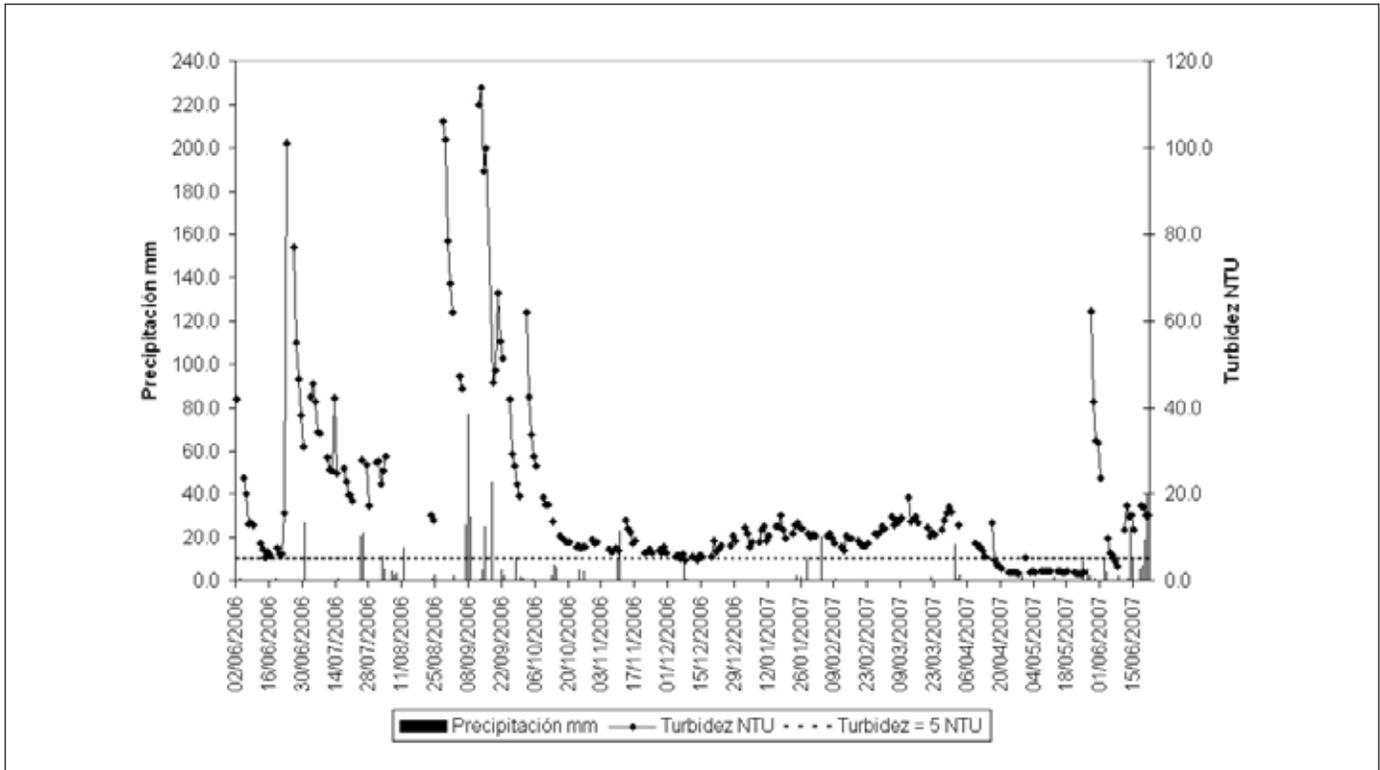


Figura 5. Precipitación y turbidez en el embalse de San José para el periodo junio de 2006 hasta junio de 2007
 Figure 5. Precipitation and turbidity in the San José reservoir during the period June 2006 to June 2007

comprendido entre junio de 2006 y junio de 2007, el valor que diariamente toma el parámetro turbidez en el canal que lleva agua desde la presa de San José hasta la entrada a la potabilizadora de la planta de los Filtros, así como los eventos y cuantía en que ha acontecido la precipitación. En dicha figura se aprecia el escaso número de días que presentan un valor de turbidez inferior a 5 NTU, así como el hecho de que todos ellos se concentran entre el 17 de abril y el 25 de mayo de 2007, salvo dos valores aislados acaecidos el 8 y el 13 de diciembre de 2006.

En la figura 5 también se observa la existencia de tres grandes picos, que superan las 100 NTU, en junio y septiembre, que son los meses de máxima pluviometría, aunque sólo uno (12 de septiembre de 2006) se encuentra directamente relacionado con el agua de precipitación, mientras que los otros dos (23 de junio de 2006 y 28 de agosto de 2006) son fruto del agua desembalsada por las presas que se localizan aguas arriba del embalse de San José. En dicha figura también se detectan otros eventos de turbidez de menor cuantía, que se producen a lo largo del periodo junio-octubre. Algunos de ellos (3 y 25 de julio de 2006, y 15 y 20 de septiembre de 2006) aparecen liga-

dos a la precipitación del agua de lluvia y a la posterior escorrentía que ésta genera, mientras que otros (13 de julio y 2 de octubre de 2006) se deben al agua desembalsada desde los embalses de cabecera (El Peaje y El Potosino). A partir de mediados de octubre en que se inicia la estación seca, y hasta la tercera semana de mayo en que nuevamente comienza la época húmeda, la turbidez disminuye drásticamente. Su valor medio en este periodo, que es de 6,72 NTU, es notablemente inferior a las 33,4 NTU que se registran como media en la época húmeda. Además, se trata de un periodo que presenta una notable estabilidad y constancia en el valor que toma la variable turbidez, como se aprecia en la figura 5.

Tras los grandes eventos de turbidez, que se han indicado anteriormente, se observa (figura 5) el efecto amortiguador que ejerce el embalse de San José, y la sedimentación que tiene lugar en el mismo. Para estudiar dicho efecto se han seleccionado en la Tabla 2 todos los periodos de sedimentación que responden a una secuencia decreciente en la que cada término de turbidez ($TU_1, TU_{2,\dots}, TU_n$) se relaciona con el inmediatamente posterior mediante la siguiente expresión:

Periodo de control			Turbidez (NTU)		Duración del periodo de control (días)	Numero de días con dato de turbidez	Origen de la Turbidez	Ecuación de la función exponencial ajustada	Cuadrado del coeficiente de correlación R ²
Serie	Fecha de inicio	Fecha de finalización	Inicial	Final					
1	2-jun-06	7-jun-06	42,0	13,0	6	4	SD	TU = 43,670e ^{-0,2202t}	0,9620
2	8-jun-06	14-jun-06	13,5	5,38	7	5	D	TU = 14,315e ^{-0,1467t}	0,9613
3	23-jun-06	30-jun-06	101,0	31,0	8	6	D	TU = 110,45e ^{-0,1736t}	0,9617
4	4-jul-06	12-jul-06	45,4	25,4	9	6	P	TU = 42,968e ^{-0,0704t}	0,9504
5	13-jul-06	21-jul-06	42,2	18,5	9	6	P	TU = 40,487e ^{-0,1068t}	0,9664
6	28-ago-06	1-sep-06	106,0	61,9	5	5	D	TU = 109,41e ^{-0,1473t}	0,9578
7	20-sep-06	27-sep-06	66,3	26,4	8	6	P	TU = 65,813e ^{-0,1232t}	0,9460
8	2-oct-06	10-oct-06	62,0	17,7	7	5	D	TU = 50,029e ^{-0,1410t}	0,9227
9	13-nov-06	21-nov-06	13,9	6,53	9	6	P	TU = 13,118e ^{-0,0930t}	0,9370
10	7-feb-07	13-feb-07	10,90	6,84	7	5	P	TU = 10,580e ^{-0,0700t}	0,9614
11	2-abr-07	13-abr-07	12,70	5,67	12	6	P	TU = 13,205e ^{-0,0660t}	0,9359
12	16-abr-07	27-abr-07	13,30	1,75	12	10	D	TU = 6,406 e ^{-0,1353t}	0,7566
13	28-may-07	8-jun-07	62,20	3,46	12	10	D y P	TU = 60,144e ^{-0,2615t}	0,9919

D: Desembalse; P: Precipitación; SD: Se desconoce

Tabla 2. Periodos de sedimentación que responden a una secuencia decreciente dentro de la serie de datos diarios de turbidez suministrada por INTERAPAS

Table 2. Sedimentation periods responding to a decreasing sequence within a series of daily turbidity data supplied by INTERAPAS

$$TU_i > TU_{i+1} \quad (1)$$

En la desigualdad (1) i es el paso de tiempo en días.

En todos los periodos de control que se han analizados se ha podido comprobar que la secuencia decreciente, que definen los valores de turbidez, se ajusta a una función exponencial del tipo

$$TU = Ae^{-Bt} \quad (2)$$

En la ecuación (2) el término A representa la turbidez en el instante inicial i=0 y el B un coeficiente complejo de dimensión, que se encuentra gobernado por la ecuación de Stokes, tanto para las partículas que sedimentan directamente por efecto de la gravedad, como para aquellas otras que, tras permanecer un tiempo más o menos largo en suspensión, lo hacen después de la acción de determinados mecanismos que favorecen la coagulación y floculación natural de las partículas coloidales. La ecuación (2) expresa matemáticamente este hecho, pues indica que se alcanza una turbidez cero para un tiempo de sedimentación infinito.

La coagulación es un proceso de desestabilización de las partículas que se encuentran suspendidas en un líquido. Éste tiene lugar mediante la incorporación

a la fase acuosa de un determinado compuesto químico que reduce las fuerzas que tienden a separar las partículas. En el caso concreto del embalse de San José es factible que el aporte de Na⁺, Ca²⁺ y Al³⁺, que pueden provenir de la alteración y descomposición de las rocas volcánicas (riolitas e ignimbritas), haga que las fuerzas de Van de Waals pasen a ser dominantes y se favorezca la desestabilización de los coloides de carga negativa.

La floculación es un proceso, que tiene lugar sobre las partículas ya desestabilizadas, que las aglutina en pequeñas masas de un peso específico superior al del líquido que las sustenta, por lo que sedimentan de acuerdo a la Ley de Stokes. El proceso tiene lugar mediante dos mecanismos que se denominan floculación ortocinética y floculación pericinética. El primero se produce sobre partículas superiores al micrón por causa de una agitación externa de tipo natural (acción del viento, corrientes de turbidez, convección térmica), que afecta al gradiente de velocidad del líquido. El segundo tiene lugar sobre partículas inferiores al micrón por causa de la agitación interna que causa el movimiento browniano. Éste, por un lado, neutraliza la escasa velocidad de sedimentación que tienen las partículas coloidales y, por otro, permite que éstas entren en contacto, se agrupen y sedimenten.

Las partículas sólidas que se encuentran en suspensión en un agua y sedimentan al reducir o anular su velocidad por efecto de la gravedad en un corto espacio de tiempo se las denomina sedimento detrítico. Las que tienen tamaño arcilla o inferior y sedimentan tras procesos naturales de coagulación-floculación se las llama sedimento coloidal. El resto, que dan lugar a una turbidez residual, determinan el límite máximo alcanzable por los procesos de sedimentación gravitacional y sedimentación tras coagulación-floculación trascurrido un tiempo "t", por lo que la turbidez residual es un factor que depende del tiempo. En la cuenca del río Santiago el mínimo valor de la turbidez residual que se ha detectado, durante el periodo analizado, ha sido de 1,7 NTU.

El coeficiente B, según los resultados que se ofrecen en la tabla 2, responde a tres comportamientos diferentes. El primero de ellos, que se ha denominado comportamiento 1, se ha identificado a partir de los periodos de sedimentación definidos por las series 4, 5, 7, 9, 10 y 11, que presentan un exponente B que respectivamente vale 0,0704; 0,1068; 0,1232; 0,0930; 0,070; y 0,066. El valor medio de dicho exponente es de 0,0882, su mediana de 0,0817 y la media ponderada de 0,1008. Esta última se ha calculado mediante la expresión:

$$\frac{\sum_{i=1}^{i=n} (TU_{i1} - TU_{F1}) \times B_i}{\sum_{i=1}^{i=n} (TU_{i1} - TU_{F1})} \quad (3)$$

Donde TU_{i1} es la turbidez inicial en el periodo de control i, TU_{F1} la turbidez final en el periodo de control i y B_i el exponente de la función exponencial que se ha ajustado para el periodo de control i. La desviación estándar es de 0,0233.

Si en la ecuación (2) se sustituye el coeficiente B por el valor de la media ponderada resulta la siguiente expresión:

$$TU_{F1} = TU_{i1} e^{-0,1008t} \quad (4)$$

Donde TU_{i1} es la turbidez inicial para el tipo de comportamiento 1, TU_{F1} la turbidez final para el tipo de comportamiento 1 y $B_1 = 0,1008$ el exponente de la función exponencial que se ha ajustado para el tipo de comportamiento 1.

La ecuación (4) proporciona la turbidez, para un instante de tiempo t, cuando ésta se debe sólo a las lluvias que acontecen en la cuenca vertiente al vaso del embalse de San José. Es decir, cuando es causa de los sedimentos que se producen a lo largo y ancho

de toda la cuenca que drena al embalse de San José. Se trata de un fenómeno aleatorio, que de acuerdo a su distribución espacial y temporal incorpora al embalse de San José material de distintos tamaños, densidades y mineralogía, que tienen tiempos de sedimentación muy diferentes. El exponente de la ecuación (2), que en este caso se ha denominado B_1 , se encuentra condicionado por aquellas partículas (principalmente limos y arcillas) que precisan de coagulación-floculación para sedimentar. Este proceso tardará un tiempo t_1 en alcanzar el valor de una determinada turbidez residual.

El segundo tipo de comportamiento (que se ha denominado comportamiento 2) queda establecida por los periodos de sedimentación que definen las series 2, 3, 6, 8 y 12, que presentan un exponente B, que respectivamente vale 0,1467; 0,1736; 0,1473; 0,1410 y 0,1353. El valor medio de dicho exponente es de 0,1488, su mediana de 0,1467 y la media ponderada, que viene definida por la expresión (3), de 0,1553. La desviación estándar es de 0,0147.

Si en la ecuación (2) se sustituye el coeficiente B por el valor 0,1553, que corresponde a la media ponderada, resulta la siguiente expresión:

$$TU_{F2} = TU_{i2} e^{-0,1553t} \quad (5)$$

Donde TU_{i2} es la turbidez inicial para el tipo de comportamiento 2, TU_{F2} la turbidez final para el tipo de comportamiento 2 y $B_2 = 0,1553$ el exponente de la función exponencial que se ha ajustado para el tipo de comportamiento 2.

La ecuación (5) proporciona la turbidez, para el instante de tiempo t, que es suma tanto de los sedimentos que contiene el agua embalsada en las presas de cabecera, como de los originados por la acción del agua, sobre el lecho del cauce del río Santiago hasta la presa de San José, en los periodos en que se desembalsan dichas presas. El agua que proporcionan las presas de El Peaje y El Potosino ha sufrido un cierto proceso de decantación, por lo que sólo contiene partículas de tamaño muy fino, que únicamente sedimentan en el embalse de San José en un porcentaje muy pequeño, tras un periodo de tiempo muy prolongado. El valor que toma el exponente B, que para este supuesto se ha denominado B_2 , se deberá casi exclusivamente a las partículas de tamaño más grueso, que se producen durante los eventos en que se desembalsa y circula agua por el cauce del río Santiago. El proceso de sedimentación tardará un tiempo t_2 en alcanzar la turbidez residual, que será menor que t_1 , puesto que en este caso el agua contiene una menor proporción de sólidos en suspensión

de tamaño coloidal, lo que implica que el exponente B_2 tome un valor más elevado que el exponente B_1 .

El exponente B de la ecuación (4) caracteriza un proceso de índole areal, mientras que el exponente B de la ecuación (5) identifica un proceso de tipo lineal, aunque se encuentra afectado por el efecto de las partículas que no han sedimentado en las presas de El Peaje y El Potosino que es de índole areal.

El tercer comportamiento (que se ha denominado comportamiento 3) lo definen los periodos de sedimentación 1 y 13. El exponente B toma respectivamente los valores 0,2202 y 0,2615. El valor medio de dicho exponente, que coincide con la mediana, es de 0,2409 y la media ponderada, que viene definida por la expresión (3), de 0,2478. La desviación estándar es de 0,0292.

Si en la ecuación (2) se sustituye el coeficiente B por el valor 0,2478, que corresponde a la media ponderada, resulta la siguiente expresión:

$$TU_{F3} = TU_{i3} e^{-0,2478t} \quad (6)$$

La ecuación (6) proporciona el comportamiento de la turbidez que tiene lugar tras un periodo de sedimentación, coagulación y floculación natural muy prolongado, donde los eventos de lluvia y agua desembalsada desde los embalses de cabecera han sido

de pequeña cuantía, por lo que las medidas de turbidez, que se han tomado en el embalse de San José, presentan valores bajos o muy bajos, sin que se presenten grandes oscilaciones temporales. La turbidez residual, dado que el porcentaje de partículas finas que han sedimentado en los embalses (El Peaje, El Potosino y el propio San José) es en este supuesto notablemente mayor que en los casos anteriores, tomará un valor más pequeño, y el exponente B dependerá todavía más de las partículas de tamaño más grueso, que sedimentan más rápidamente, por lo que su valor será mayor que en los dos casos que se han tratado anteriormente.

La expresión (2) se puede escribir como:

$$\log TU = \log A - Bt \log e \quad (7)$$

Dado que el log e es igual a 0,4343, la ecuación (7) en coordenadas semilogarítmicas es una recta que permite determinar gráficamente el valor del coeficiente B mediante la expresión:

$$B = \frac{1}{0,4343 \Delta t_{\text{Ciclo}}} \quad (7)$$

En la tabla 3 se muestra el tiempo (días) que se tarda en alcanzar una turbidez de 1,7 NTU y 5 NTU mediante un proceso natural de sedimentación gravitacional y sedimentación tras coagulación-floculación también de tipo natural. En la misma se observa que dicho tiempo es muy largo, especialmente cuando la turbidez inicial es alta. Éste, en el mejor de los casos es de 2,8 días, por lo que se precisa complementar el proceso natural, que tiene lugar en el embalse de San José, con otro artificial, que permita una rápida reducción de la turbidez, que lleva el agua que se pretende recargar, ya que lo contrario resultaría antieconómico.

INTERAPAS también ha proporcionado una serie de datos, que se representan en la figura 6 y se muestra su valor en la tabla 4, sobre el grado de turbidez que presenta el agua procedente de la presa de San José a la entrada y salida de la planta potabilizadora de Los Filtros. El rango de entrada a la planta de tratamiento es muy amplio, pues varía entre 2,86 NTU y 97,10 NTU, mientras que la banda de salida se restringe a valores inferiores a 4 NTU, salvo uno que no cumple la norma NOM-127-SSA1-1994. De acuerdo a los valores suministrados en la tabla 4, el 91% del efluente resulta apto para recarga artificial, si sólo se tiene presente el punto de vista de almacenar agua en el acuífero con una turbidez (máximo de 5 NTU) adecuada al uso al que mayoritariamente se destinará (abastecimiento urbano).

A	B		
	0,1008	0,1553	0,2478
100	29,7/40,4	19,3/31,9	12,1/20,0
90	28,7/39,4	18,6/31,3	11,7/16,0
80	27,5/38,2	17,8/30,5	11,2/15,5
70	26,2/36,9	17,0/29,6	10,6/15,0
60	24,6/35,3	16,0/28,6	10,0/14,4
50	22,8/33,5	14,8/27,4	9,30/13,6
40	20,6/31,3	13,4/26,0	8,40/16,3
30	17,8/28,5	11,5/24,2	7,20/11,6
20	13,7/24,4	8,90/21,5	5,609,90
10	6,90/17,6	4,50/17,1	2,80/7,10

Tabla 3. Tiempo en días que se tarda en alcanzar una turbidez de 1,7 NTU (Turbidez residual) y 5 NTU (Turbidez máxima admitida para abastecimiento urbano) para los distintos valores que toma el exponente B en la ecuación $TU = Ae^{Bt}$. En dicha ecuación el término A representa la turbidez inicial y B un coeficiente de dimensión *Table 3. Time in days needed to achieve a turbidity of 1.7 NTU (Residual turbidity) and 5 NTU (Maximum turbidity allowed for urban supply) for the different values adopted by exponent B in the equation $TU = Ae^{Bt}$. In this equation, term A represents the initial turbidity and B is a coefficient of the dimension*

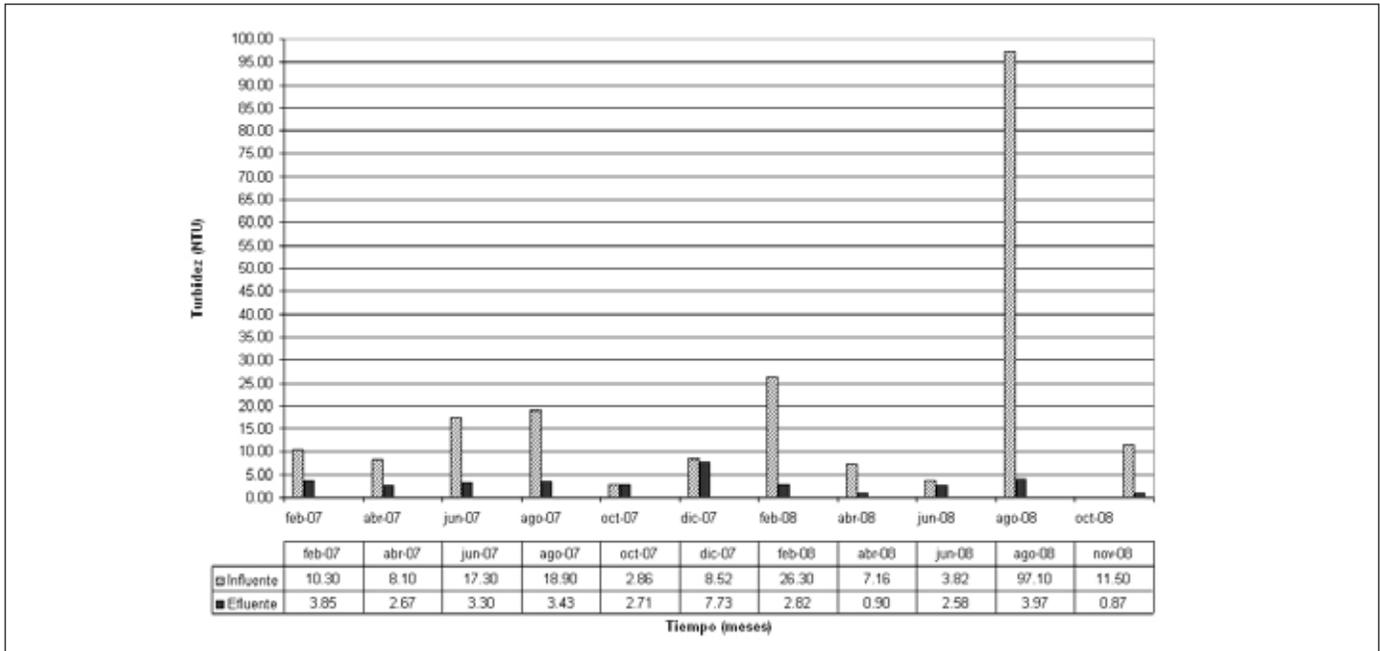


Figura 6 y Tabla 4. Turbidez del influente y del efluente de la planta potabilizadora de los Filtros para distintos periodos de control
 Figure 6 and Table 4. Turbidity of the influent and the effluent for different control periods in the Filters water treatment plant

Si se hace uso de las ecuaciones que proporcionan los trabajos de Packman *et al.* (1999), Lewis *et al.* (2002), Holliday *et al.* (2003), Marquis (2005), Randerson *et al.* (2005) y Fenton, (2006), que correlacionan sólidos en suspensión con turbidez, no se obtiene, para la serie histórica representada en la figura 5 (periodo junio de 2006-junio de 2007), ni un solo valor de sólidos en suspensión inferior a 1mg/L. Si el límite se sitúa en 2 mg/L el resultado es de tres valores (1,24%), si se utiliza la ecuación de Lewis *et al.* (2002), y de 8 valores (3,31%), si se utiliza la ecuación de Marquis (2005). Si se utilizan los valores que se proporcionan en la tabla 4, para el efluente de la planta potabilizadora de los Filtros, no se obtiene ni un solo valor de sólidos en suspensión que sea inferior a 2 mg/L. Estos datos indican, que si se quiere operar rigurosamente la instalación de ASR, que se pretende construir en el acuífero granular profundo de San Luis de Potosí, se precisa complementar ésta con una planta de potabilización, que suministre a su salida una calidad del agua de recarga con un contenido de sólidos en suspensión inferior a 1mg/L.

En el supuesto de que fuera factible plantear una operación de recarga artificial de tipo superficial, como alternativa a la planta de ASR que se tiene previsto construir, se podría contemplar un contenido de sólidos en suspensión en el agua de recarga notablemente mayor, por lo que no sería necesario proceder a un tratamiento de clarificación y filtrado tan riguroso,

como el que precisan las instalaciones de ASR, cuando éstas recargan y explotan acuíferos granulares.

A partir de las ecuaciones (4), (5) y (6) se ha estimado (Figura 7), para cada uno de los términos de la serie histórica de turbidez que ha proporcionado INTERAPAS, el tiempo en días que se tarda en alcanzar una turbidez equivalente a un contenido en sólidos en suspensión de 10 mg/L. Ésta, que tiene un valor 6,9 NTU, se ha calculado promediado los valores que proporcionan las ecuaciones de Packman *et al.* (1999), Lewis *et al.* (2002), Holliday *et al.* (2003), Marquis (2005), Randerson *et al.* (2005) y Fenton, (2006). Los resultados obtenidos indican que el tiempo medio que se precisa para que todos los términos de la serie estudiada alcancen una turbidez equivalente a un contenido en sólidos en suspensión de 10 mg/L es de 6,7 días, cuando el exponente B vale 0,1008; 4,3 días cuando el exponente B vale 0,1553; y 2,7 días cuando el exponente B vale 0,2478. Si sólo se recargara durante la época seca dicho tiempo se reduciría respectivamente a 3,6 días, 2,3 días y 1,4 días, pero si se operara únicamente en la época húmeda éste sería de 12,7 días, 8,2 días y 5,2 días.

Las ecuaciones (4), (5) y (6) también permiten determinar el número de eventos que partiendo de una determinada turbidez inicial alcanzan una turbidez equivalente a un contenido en sólidos en suspensión de 10 mg/L en un tiempo t. Los resultados obtenidos se sintetizan en la tabla 5. En la misma se

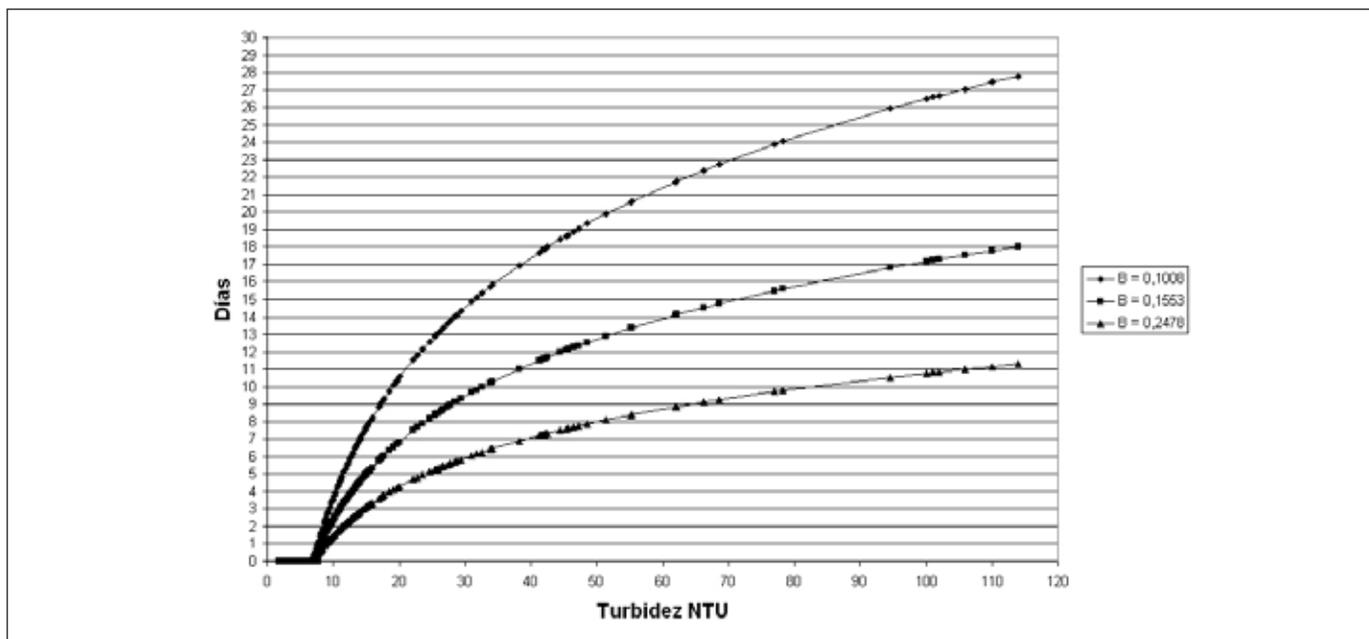


Figura 7. Tiempo en días, que se tarda en alcanzar una turbidez equivalente a un contenido en sólidos en suspensión de 10 mg/L, en función de la turbidez medida en el canal de salida de la presa de San José

Figure 7. Time in days needed to achieve a turbidity equivalent to a suspended solid content of 10 mg/L, given the mean turbidity of the exit channel of the San José reservoir

observa que, para cualquier valor del exponente B, acontecen 60 eventos en la serie histórica analizada (24,8 % del total muestreado), que presentan un contenido en sólidos en suspensión en el canal de salida del embalse de San José, que permitirían la recarga directa en una instalación de tipo superficial.

En dicha tabla también se observa que hay 84 eventos (35,9 % del total muestreado), que presentan un contenido en sólidos en suspensión a la salida del embalse de San José, que precisan de un tiempo superior a una semana para alcanzar una turbidez equivalente a un contenido en sólidos en suspensión de 10 mg/L. Del análisis del resto de las situaciones que se presentan en dicha tabla, se deduce que si operativamente fuera factible construir instalaciones de sedimentación, donde el agua de recarga permaneciera entre uno y tres días en reposo, antes de proceder a su introducción en el acuífero, se podrían aprovechar a través de instalaciones de recarga artificial de tipo superficial el 50% de los eventos de caudal, que se descargan a través del canal de salida del embalse de San José.

Conclusiones

En una primera aproximación se ha podido caracterizar el comportamiento de la turbidez en el embalse

de San José para el periodo que abarca entre junio de 2006 y junio de 2007, así como el contenido de sólidos en suspensión presentes en el agua susceptible de emplear en la operación de recarga artificial, que se ha planificado para el acuífero granular de San Luís de Potosí.

A este respecto cabe indicar que los condicionantes de calidad que precisan las instalaciones de recarga artificial de tipo sondeo, cuando éstas se operan en acuíferos detríticos, requieren reducir el contenido de sólidos en suspensión a una cantidad inferior a 1mg/L. Esta cifra no parece que sea factible de alcanzarse mediante sedimentación natural en el caso particular de la futura planta de ASR que recargará el acuífero granular profundo, que subyace a la ciudad de San Luís de Potosí (México), en un tiempo razonablemente corto, por lo que será preciso dar al agua de recarga un tratamiento adicional de clarificación y filtrado similar a una potabilización.

El estudio realizado ha permitido caracterizar la respuesta de la turbidez en el embalse de San José. Ésta se ajusta a un comportamiento de tipo exponencial decreciente con el tiempo, cuyo exponente varía de acuerdo a la tipología del proceso que origina el aporte de agua al embalse.

Los datos suministrados por INTERAPAS a la salida de la potabilizadora de los Filtros muestran que el actual tratamiento, que se da al agua procedente de

Tiempo en días que se tarda en alcanzar una turbidez equivalente a un contenido en sólidos en suspensión de 10 mg/L.	B = 0,1008	B = 0,1553	B = 0,2478
0	60	60	60
1	8	16	30
2	13	23	34
3	17	22	33
4	15	20	18
5	11	22	12
6	15	11	15
7	16	8	7
Más de 7	87	60	33
Total	242	242	242

Tabla 5. Número de eventos que partiendo de una determinada turbidez inicial alcanzan una turbidez equivalente a un contenido en sólidos en suspensión de 10 mg/L en un tiempo t

Table 5. Number of events which, departing from a specified initial turbidity, would achieve a turbidity equivalent to suspended solid contents of 10 mg/L in a time t

la presa de San José, no proporciona los estándares de calidad que precisa una instalación de recarga artificial tipo sondeo profundo de ASR, por lo que habría que mejorar la operatividad de dicha planta o construir una nueva capaz de proporcionar los requerimientos de sólidos en suspensión que se demandan para este tipo de instalaciones.

Cuando se trata de instalaciones de recarga artificial de tipo superficial es admisible trabajar con un contenido en sólidos en suspensión notablemente mayor que el requerido por una planta de ASR, por lo que no es necesario realizar un tratamiento de clarificación y filtrado de tanta envergadura, como el que precisa este último tipo de instalaciones, sobre todo cuando el acuífero es granular. En el caso particular de San Luís de Potosí, si las instalaciones de recarga artificial que se pretenden construir fueran de tipo superficial, se podría realizar un mejor aprovechamiento de las disponibilidades hídricas, si se construyeran balsas de sedimentación donde el agua permanezca en reposo entre uno y tres días antes de proceder a su recarga.

Esta misma forma de proceder puede resultar beneficiosa en instalaciones de recarga artificial tipo pozo, cuando los acuíferos son fisurados o karstificados, ya que el contenido de sólidos en suspensión, que pueden admitir estos acuíferos, es notablemente superior al requerido por los acuíferos granulares.

Agradecimientos

El autor agradece la confianza mostrada por la Comisión Nacional del Agua de San Luís de Potosí y la Organización Meteorológica Mundial encargándole la realización del informe que ha dado lugar al presente artículo. Asimismo manifiesta su más profunda gratitud a todos aquellos estamentos y entidades que le han recibido y proporcionado información, como son el Ayuntamiento de San Luís de Potosí; el Ayuntamiento de Soledad de Graciano Sánchez; la Agencia Hábitat; la Agencia Potosina de Desarrollo, el Gobierno del Estado de San Luís de Potosí, la Secretaría de Desarrollo Social de San Luís de Potosí e INTERAPAS.

Referencias

- Avedaño, C. y Cobo, R. 1998. Seguimiento de los sólidos en suspensión durante el vaciado del embalse de Joaquín Costa. *Limnética* 14: 113-120.
- Brown, C. J.; Hatfield, K. and Newman M. 2006. Lessons learned from a review of 50 ASR projects from the United States, England, Australia, India and Africa. University of Florida. www.ucowr.siu.edu.
- Cardona Benavides, A. 2007. Hidrogeoquímica de sistemas de flujo regional, intermedio y local. Resultado del marco geológico en la mesa central: reacciones, procesos y

- contaminación. Tesis Doctor en Ciencias de la Tierra. Universidad Nacional Autónoma de México. 252 pp.
- Carrillo J. J. 1992. The hydrogeology of the San Luis Potosí Area (Mexico). Thesis Doctor. Department of Geological Sciences. University of London. United Kingdom. 184 pp.
- Carrillo-Rivera, JJ; Cardona, A y Moss, D. 1996. Importance of the vertical component of groundwater flow: a hydro-geochemical approach in the valley of San Luis Potosi. Mexico. *Journal of Hydrology* 185. 23-44.
- CNA. 2004. Manejo integrado y sostenible del agua en la Región Centro de San Luis Potosí. Anexo K: El potencial de la recarga artificial de los acuíferos. Programa de Modernización del Manejo del Agua (PROMMA). Comisión Nacional del Agua. Subdirección General Técnica. Organización Meteorológica Mundial. Informe Número 190. 34 pp.
- CNA. 2006. Proyecto de fortalecimiento del manejo integrado del agua (PREMIA). Temas Especializados de Consultoría para la evaluación de los recursos hídricos en el Manejo Sustentable del Agua Subterránea en San Luis Potosí (SLP). *Análisis de alternativas de recarga artificial*. Comisión Nacional del Agua. Subdirección General Técnica. Organización Meteorológica Mundial. 25 pp.
- Custodio Gimena, E. (1986). Recarga Artificial de Acuíferos. Avances y Realizaciones. *Boletín de Informaciones y Estudios* n° 45. Servicio Geológico. Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo. España: 134 pp.
- DGSA. 1994. Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994. Salud Ambiental, Agua para Uso y Consumo Humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización. Dirección General de Salud Ambiental. Comité. Consultivo Nacional de Normalización de Regulación y Fomento Sanitario. 8 pp.
- Fenton, C. 2006. Turbidity and suspended sediment yields. Freshwater Creek and Elk river operation report. Humboldt County (California). Redwood Community Action Agency Humboldt Bay. Water Quality. Improvement Program. 17pp.
- Gavilan, C.J. y Murillo, J.M. 1997. Metodología para la optimización de instalaciones de recarga superficial. Dimensionamiento de filtros. Aplicación a las instalaciones del río Oja. *Boletín geológico y Minero*. 108(2) 129-137.
- Holliday, C.P.; Rasmussen T.C. and Miller W. P. 2003. Establishing the relationship between turbidity and total suspended sediment concentration. Georgia Water Resources Conference. In: Hatcher, J. (Editor). Institute of Ecology, The University of Georgia, Athens, Georgia.
- Lewis, D.J.; Tate, K. W.; Dahlgren, R. A. and Newell J. 2002. Turbidity and Total Suspended Solid Concentration Dynamics in Streamflow from California Oak Woodland Watersheds. USDA Forest Service Gen. Tech. Rep. PSW-GTR-184. 107-118.
- Martínez, V, J. y Aguirre, M. A. 1987. Geohidrología de San Bartolo de Berrios. Cuenca de Villa de Reyes-San Luis Potosí. Instituto de Geología y Metalurgia, UASLP, Folleto Técnico (108) 29 pp.
- Martínez Hernández, S. 1996. Calibración del modelo matemático del acuífero profundo del valle San Luis Potosí. Tesis Grado Maestro en Ingeniería Hidráulica. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Centro de Investigación y Estudios de Posgrado. Facultad de Ingeniería. 114 pp.
- Martínez Ruiz, V. J. (1997). Actualización del marco geológico del subsuelo del valle de San Luis Potosí. UASLP, Instituto de Geología, Folleto Técnico (123) 19 p.
- Marquis, P. 2005. Turbidity and Suspended Sediment as Measures of Water Quality. *Watershed Management Bulletin*. 9. (1). 21-23.
- Murillo Díaz, J.M. 1994. Efecto de la colmatación en la estimación de la vida útil de una instalación de recarga artificial. *Boletín Geológico y Minero*. 105 (6) 39-47.
- Packman, J.J.; Comings, K.J. and Booth, D.B. 1999. Using turbidity to determine total suspended solids in urbanizing streams in the Puget Lowlands: in *Confronting Uncertainty: Managing Change in Water Resources and the Environment*, Canadian Water Resources Association Annual Meeting, Vancouver, BC. (27-29).158-165.
- Pavelic, P.; Dillon, P.J.; Barry. K.E.; Vanderzalm, J.L.; Correll, R.L. y Rinck-Pfeiffer, S.M. 2007. Water quality effects on clogging rates during reclaimed water ASR in a carbonate aquifer. *Journal of Hydrology*. 334. (1-2).1-16.
- Pérez Paricio, A. y Carrera, J. 1999. Clogging handbook. Informe no publicado. Universidad Politécnica de Cataluña. 118 pp.
- Pyne, R. 1995. Groundwater Recharge and Wells. A Guide to Aquifer Storage Recovery. Lewis Publishers. United States of America. 365 pp.
- Randerson, T.J.; Fink, J.C.; Fermanich, K.J.; Baumgart, P and Ehlinger, T. 2005. Total Suspended Solids-Turbidity Correlation in Northeastern Wisconsin Streams. <http://www.uwgb.edu/watershed>
- Truhlar J. F. 1978. Determining suspended sediment loads from turbidity records. *Hydrological Sciences-Bulletin-des Sciences Hydrologiques*, 23, 4, 12. 409-417.

Recibido: julio 2009

Revisado: septiembre 2009

Aceptado: septiembre 2009

Publicado: octubre 2009