

Un caso paradigmático de la evolución hidrogeológica en dichas zonas: San Luis Potosí. Aspectos resaltantes para la discusión.

Agua para el desarrollo urbano en regiones áridas y semiáridas: un tema fundamental para México

Un caso paradigmático de la evolución hidrogeológica en dichas zonas: San Luis Potosí. Aspectos resaltantes para la discusión.

Introducción

Alrededor del 75% del territorio nacional registra una super-expansión urbana, donde el agua subterránea representa la única o principal, la más simple e importante fuente de abastecimiento no sólo por las ventajas económicas que representa (relativas a su bajo costo, cantidad, calidad y a otras comparadas con los reservorios –embalses-artificiales) para el desarrollo de ciudades medias y metrópolis competitivas sino porque más del 52.8% de la superficie total del país se define como árida y semiárida presentando condiciones de escasa precipitación (menos de 300 a 500 mm/año), elevada evaporación potencial, escasa presencia de aguas superficiales permanentes y degradación/contaminación de éstas. De hecho en cuanto a los aprovechamientos de agua en México el 75% (228 m³/s) de los usos urbanos de agua es de origen subterráneo, lo mismo ocurre en cuanto a los usos industriales (59 m³/s) -donde sólo se cuenta con un registro parcial- y aunque para el riego en estas zonas el agua subterránea constituya el 30% sin embargo estadísticamente representa $\frac{3}{4}$ partes del total de las extracciones del vital líquido (636m³/s).

Tomar en cuenta la importancia del agua subterránea en un sentido integral –no sólo económico- y preciso/específico –particularidades que adquieren los acuíferos debidas a la estructura topográfica, geológica y tectónica de México y la región donde se encuentra inserta- es una tarea fundamental que va más allá del asunto técnico hidráulico o del conocimiento hidrogeológico general (como se piensa de manera generalizada en las discusiones sobre la problemática del manejo del agua en México) para trascender hacia cuestiones territoriales. No sólo por el nuevo papel que adquiere el diseño de las redes de infraestructura hidráulica en la administración y creación de incentivos y desincentivos para el desarrollo de diversas economías a escala incluso planetaria, sino porque las deficiencias e ineficiencias hidráulicas expresan en su base cómo se define y si se reconoce o no la problemática hidroambiental y sus soluciones. La prescripción administrativa -soportada en la científica y sus herramientas tecnológicas- respecto a la asequibilidad/disponibilidad adecuada y confiable del agua dada la complejidad de los sistemas acuíferos en zonas áridas/semiáridas se vuelve trascendental en el tiempo y estratégica para las posibilidades del desarrollo del agua en dichas zonas; y un fenómeno emergente ligado a ello el aseguramiento del abastecimiento local- regional de agua así como la aplicación de los principios de la hidrogeología urbana emergente para la definición de las políticas de suelo.

En ese sentido se propone realizar un balance respecto al análisis del desarrollo del agua subterránea en dichas zonas. Se presentan aspectos resaltantes de un estudio[1] paradigmático -respaldado por más de 10 años de investigación especializada transdisciplinaria y generación de información seleccionada y adecuada para su interpretación hidrogeológica- donde se aplican innovaciones científicas y técnicas de la Hidrogeología Subterránea en lo referente al desarrollo de marcos conceptuales y la aplicación congruente de diversas técnicas para definir los acuíferos y entender su comportamiento en zonas geológicas con características especiales como la de la Sierra Madre Occidental donde funciona un sistema de flujo regional y se identifican jerarquías de zonas de recarga y descarga. Se abordan tres aspectos que engloban una serie de problemáticas hidrogeológicas que han sido calificadas en México desde enfoques parciales: a) marco hidro-geológico, b) ecuación de balance y c) abatimiento del nivel freático, con el objetivo de mostrar la obsolescencia y/o progreso en conceptos, herramientas y ecuaciones para caracterizar la permeabilidad, el movimiento y la cantidad y calidad del agua. A través de dicha reseña se muestran las dificultades metodológicas y los vacíos de información más importantes que se deben enfrentar en México. Este ejercicio indica que la adopción y apoyo de estudios como el presentado coadyuvaría a alcanzar niveles mínimos de inversión en infraestructura hidráulica y la eficiencia en el manejo de agua en estas zonas. Finalmente se incluye una nota que busca señalar la correlación entre los cambios en la gestión, la influencia de la infraestructura y la tecnología como inductores de patrones de crecimiento para el caso presentado.

Localización y justificación del caso de estudio.

El estudio y entendimiento del entorno hidrogeológico de San Luis Potosí (SLP), localizada en una región semiárida de México (al Norte del país, en el extremo sur de la Sierra Madre Occidental) guarda relevancia porque comparte condiciones hidrogeológicas similares con más de la mitad del territorio nacional y se cuenta con información disponible para aplicar metodologías y herramientas de innovación científica en el ámbito de la Hidrología Subterránea.

Conceptos, técnicas y herramientas innovadoras para caracterizar el desarrollo del agua en las zonas áridas y semiáridas de México.

Listado de temas y problemáticas críticas de la geohidrología en México.

Los aspectos tradicionalmente más importantes y críticos de los cuales se hará un breve balance guardan relación en términos generales con 1) cómo se interpreta el marco geológico para la conceptualización de acuífero en las zonas áridas y semiáridas desde una perspectiva hidrogeológica que integre de manera congruente los estudios hidrológicos, hidrogeoquímicos, etc., 2) qué problemas se han identificado y considerado como clásicos o crónicos en el desarrollo del agua en las zonas áridas y semiáridas (y en general en todo el país) y cómo se interpretan y evalúan. El más importante lo constituye 2.1) la diada abatimiento /sobreexplotación. Este aspecto supone una esquematización conceptual respecto 2.1a) al funcionamiento y relación entre la cuenca superficial y la profunda. Y se basa en evaluaciones hechas a partir de 2.1b) la determinación de la recarga, 2.1c) la estimación del almacenamiento y la información e interpretación realizada de los registros de pozos. 2.2) La necesidad motivada desde los 60's para realizar evaluaciones del recurso hídrico en base al 2.2a) empleo de ecuaciones, técnicas, disponibilidad e interpretación de información propias más bien para zonas templadas del hemisferio norte o que implican aspectos complejos o situaciones ajenas a las identificadas en las zonas áridas; en base a éstas se han realizado cálculos del 2.3) balance hidrológico que se integran a balances hídricos

globales donde aún no se integra claramente un análisis riguroso de la parte subterránea del ciclo del agua y hay imposibilidad para realizar calibraciones de resultados. Otro aspecto problemático tiene que ver con 2.4) la relación establecida entre consolidación/extracción de agua la cual presenta condiciones diferentes a la respuesta del acuitardo en la ciudad de México. 2.5) El control de calidad del agua en las zonas áridas y semiáridas, así como en acuíferos profundos se vuelve primordial en México, considerado como un país con fluorosis endémica asociada a la presencia natural de flúor y arsénico en el agua subterránea. Este aspecto se relaciona también con 2.6) problemas en el diseño, construcción y operación de pozos de gran impacto económico ambiental en las zonas áridas. Finalmente relacionado con la concepción y problemática real de abatimiento en los pozos se encuentra el 2.6a) aumento en los costos asociados a la extracción de agua en estas zonas: tanto en consumos de energía, como en costos de bombeo, 2.6b) pérdida de otras fuentes de agua (manifestaciones de descarga) en las regiones áridas y semiáridas, así como 2.6c) imposibilidad de manejo de tecnologías adecuadas de bajo impacto y costo; diseño de 2.6d) proyectos de ingeniería e infraestructura hidráulica grandes, costosos y/ o inadecuados, en ocasiones imposibles de realizar así como 2.6e) imposibilidad de evaluaciones del agua que permitan un manejo eficiente en zonas hidrogeológicas complejas como las zonas áridas de México.

a) Marco hidro-geológico y su impacto en la interpretación de la respuesta hidrológica en la zona de estudio.

La determinación completa e integrada de la jerarquización de los sistemas de flujo representa un aspecto primordial en las zonas áridas y semiáridas. Para ello se requiere caracterizar el marco geológico tomando en cuenta los avances de la Hidrogeología moderna. En el caso de las zonas áridas y semiáridas de México el estudio de las formaciones geológicas permite establecer: 1) la magnitud de la cuenca superficial y la cuenca profunda; 2) la relación entre las formaciones geológicas y la existencia de continuidad hidráulica que significa la presencia de un acuífero de gran extensión (a partir de la cual se comprueban condiciones hidrogeológicas similares en las zonas áridas y semiáridas de México)[2]. Continuidad que se fundamenta en el hecho de que la formación de sistemas de fracturas y fallas afectaron regionalmente las unidades volcánicas de la Sierra Madre Occidental. En este estudio se emplearon varias herramientas y correlaciones. Se detectaron lineamientos estructurales regionales en imágenes de satélite y se corroboraron con trabajos de campo. 3) El tipo de materiales identificados en las fosas, así como los materiales volcánicos fracturados permiten definirla como unidad hidrogeológica continua, anisótropa y heterogénea. 4) Esta definición es fundamental y trascendental en las explicaciones e interpretaciones de las diferentes conductividades hidráulicas y el movimiento del agua subterránea en esas zonas. 5) Con base en el análisis de dos tipos básicos de material: granular y fracturado, así como en estudios de granulometría e interpretación de registros litológicos y su correlación con los registros eléctricos verticales, etc. no sólo se corroboró la existencia de un acuífero de magnitud regional de la Sierra Madre Occidental sino la presencia de un acuífero colgado en la zona de estudio, de comportamiento peculiar. 6) Finalmente un aspecto que refiere la complejidad del acuífero es la respuesta hidráulica de los diferentes medios geológicos identificados, pues al tradicional reconocimiento de la porosidad (del material granular) se suma el estudio específico de los materiales fracturados (de las rocas volcánicas) y el funcionamiento conocido como doble porosidad (asociado a las tobas). Este conjunto de aspectos representa una evolución y transformación del esquema tradicional prevaleciente en México y en especial en estas zonas donde se caracterizaba al acuífero con una parte renovable (cuenca superficial) y se establecía la existencia de un almacenamiento no renovable - que sin embargo no se había podido determinar ni rigurosamente ni con exactitud dado

que se consideraba posiblemente una desviación del concepto clásico. Sin embargo a partir de ese esquema no validado ni determinado rigurosamente se determinó que la extracción de la parte no renovable inicia un proceso de sobreexplotación. En base a dicho concepto se han tomado decisiones y lineamientos técnicos y legales, por lo que se requiere tomar en cuenta los resultados arrojados por la innovación científica y tecnológica.

b) Algunos aspectos críticos de la Ecuación de Balance Hidrológico en las zonas áridas para las mediciones y modelos.

En México se ha dado mayor peso al análisis hidrológico y a la hidráulica superficial otorgándole mucha importancia al cálculo del balance hídrico superficial sin tomar en cuenta 1) la prioridad natural y económica que representa el agua subterránea para la mayor parte del país y por tanto la 2) necesidad de incluir como parte fundamental de las mediciones y modelos los controles de la porción subterránea del ciclo hidrológico mediante la consideración de la interdependencia de tres campos: geológico (marco de referencia), hidrológico (determinación en base al marco de referencia de las zonas de recarga y descarga) e hidráulico (interacción entre el marco geológico e hidrológico como condicionantes del movimiento de agua), así como 3) la definición e interpretación adecuada de las reacciones químicas entre el agua y el material geológico y 4) la respuesta física del agua (también respecto a condiciones de bombeo) (Price, 2003). De modo que un Balance Integral de Agua debe reconocer este conjunto de aspectos. Adicionalmente en México y en especial en las zonas áridas y semiáridas es estratégico 5) el reconocimiento de la diferencia entre el parteaguas superficial y el subterráneo pues no coinciden y determinan la jerarquía de las recargas y descargas.

Los estudios realizados en la zona de estudio -desde la perspectiva del Balance hidrológico como método para evaluar los recursos hídricos- así como los resultados obtenidos y el empleo de éstos en ecuaciones para estimar la recarga y el valor del coeficiente de almacenamiento presentan diversas problemáticas. Las más generales se refieren a 6) la falta de información adecuada y fiable (por ejemplo respecto a los pozos y el empleo de métodos indirectos para estimar caudales de extracción). Y a 7) los métodos de balance empleados que a) fueron diseñados para zonas templadas del hemisferio norte donde se registra mayor precipitación y continuidad en la capa de suelo -que regula la infiltración de agua y la humedad- y b) en la mayor parte de los casos se trata de ecuaciones de balance de energía para determinar la presencia de agua en la atmósfera y su consumo en cultivos, por lo que no son adecuados para las zonas áridas donde ocurre una precipitación torrencial, la lluvia media anual se registra sólo en unos días, la precipitación no es uniforme en el espacio y en las partes altas de la cuenca -por ejemplo- los suelos son inexistentes. Además de que hidrogeológicamente importa considerar la infiltración en tiempos cortos (incluso de horas). c) La densidad de estaciones climatológicas comúnmente es del orden de 40 km² en otros países sin embargo en la zona de estudio es de hasta más de 200 km². Además c) se carece de datos para ecuaciones del tipo de la de Penman; o d) se intentan suplir con la aplicación de otras fórmulas; e) cuando se carece de información se transmutan parámetros definidos en cuencas cercanas; f) se realizan cálculos tomando promedios mensuales "para efectos prácticos". Por lo que es más recomendable realizar promedios diarios ya que ello implicaría reconocer por un lado que el valor registrado de precipitación corresponde sólo a un determinado número de días (propio para las zonas áridas y semiáridas) u horas y en segundo lugar que el material sobre el que se precipita tratándose de roca fracturada implica una evapotranspiración mucho menor, lo cual obliga a considerar el tipo y grado de crecimiento de vegetación en

dichas zonas y que una gran cantidad de agua se infiltra y no está disponible en el suelo. En resumen, 8) este conjunto de métodos no corresponde ni es adecuado en su diseño para aplicarse a las zonas áridas, implica un conjunto de condiciones y de información con la que no se cuenta y finalmente no se practica la calibración de resultados. 9) Es preciso que en México se tome conciencia de que en la literatura especializada y a nivel internacional se sigue considerando la cuantificación de la recarga de los acuíferos como uno de los puntos más débiles de la Hidrología subterránea a pesar de los numerosos esfuerzos por vía hidrodinámica y de balance de masas y energía pues quedan muchas incógnitas por definir. En ese sentido 10) los aspectos químicos e isotópicos ambientales son capaces de informar sobre la evaporación en áreas áridas. Asimismo 11) la identificación y desarrollo de indicadores ambientales físicos y biológicos (presencia de freatofitas, manantiales y caudal base en ríos, localización geográfica en base a registro histórico de las "aguas artesianas", etc.) resulta extremadamente importante en dichas zonas para preservar los ecosistemas particulares e identificar jerarquías de descarga. Además 12) continúan efectuándose investigaciones donde se realizan profundas revisiones en los conceptos que subyacen a los métodos de cálculo de la evapotranspiración donde se recogen los aportes tanto de la botánica, como de la edafología y la agronomía; por lo que se precisa actualizar la información y conocer la utilidad o no para las zonas áridas y el marco geológico de México de las diversas estimaciones de Balance. En resumen las cuestiones problemáticas relativas al cálculo de la recarga están claramente identificadas y son presentadas por ejemplo en Cursos Internacionales de Hidrología Subterránea.

Considerar estos aspectos críticos es de importancia estratégica pues en base a la Ecuación de Balance se realizan predicciones relacionadas con diferentes arreglos de escenarios extracción-abatimiento-tiempo. Esto se traduce directamente en cuestiones de administración: definición de posibilidades para disponer y cuánto de los recursos hídricos, caudal máximo de extracción, grado de abatimiento permisible, etc.

c) Interpretación y problemáticas involucradas en el abatimiento del nivel freático en las zonas áridas y semiáridas de México.

Es necesario considerar que el abatimiento que se registra en el pozo de bombeo es el resultado de varios efectos, entre los más importantes identificados en el caso de estudio se encuentra el papel del flujo en el acuífero, la entrada del agua en el pozo, la operación conjunta inadecuada de pozos cercanos. Resulta apresurado entonces adjudicar el déficit de agua detectado al abatimiento observado y más aún excedido calificar al acuífero como sobreexplotado. Íntimamente relacionado con la cuestión de los abatimientos se encuentran una serie de problemas de orden técnico/administrativo. 1) Las condiciones de perforación desde los 60's carecen en México de un control adecuado, por lo que las pérdidas de pozo (medida de eficiencia del pozo relacionada con la energía requerida para elevar el agua hacia la superficie del terreno y el mantenimiento de un abatimiento mínimo posible) son atribuibles a acciones equivocadas durante la perforación, construcción, diseño y operación del pozo. Este conjunto de aspectos crean una reducción de la conductividad hidráulica en la zona de entrada de agua al pozo. 2) Un aspecto sumamente crítico en México y de gran impacto para las zonas áridas es que desde los 70's se registró un boom y predominio de pozos de bombeo por sobre los de exploración, restándole no sólo importancia a los sondeos exploratorios que tradicionalmente se venían realizando sino a la práctica de lecturas de prueba en pozos de observación o piezómetros. Resulta imperioso realizar dichas prácticas en las zonas áridas para evitar las pérdidas de pozo y observar el control geológico en los abatimientos. 3) En un siguiente orden de

importancia se encuentra la consideración correcta de las conductividades hidráulicas. Por ejemplo 4) una de las causas de los comportamientos peculiares del nivel freático descubiertos en este estudio se asocia a los diferentes tipos de litología tanto en sentido vertical como horizontal del acuífero pues determinan características hidráulicas variables. El medio de doble porosidad establece una respuesta a la extracción donde inicialmente el agua fluye de las fracturas y después del agua almacenada en la matriz porosa de los bloques. Este es un factor que cambia la interpretación de la respuesta a la extracción además de que su identificación implica no sólo reconocer la anisotropía y heterogeneidad del medio (lo cual vuelve obsoleto el cálculo de la transmisividad de aplicación para un medio continuo, homogéneo e isótropo) sino comporta una respuesta química del agua extraída de vital importancia para el manejo del agua subterránea en esta zona. En resumen 5) el análisis de la evolución abatimiento-tiempo debe ser cuidadoso y considerar las características peculiares del medio, elegir las ecuaciones adecuadas para realizar diversos cálculos (velocidad, movimiento y dirección del agua) así como la interpretación asociada a la calidad del agua.

Nota sobre cambios en la gestión, influencia de la infraestructura y la tecnología como inductores de patrones de crecimiento.

La parte más amplia e importante de la geohidrología en México se realizó a partir de 1935 hasta mediados de fines de los 60's de manera institucional (en los 70's se establece otro modelo de manejo y gestión del agua). Hasta entonces la gestión del agua subterránea se encontró orientada en lo general a grandes proyectos y al abastecimiento doméstico e industrial de las ciudades emergentes y en desarrollo. Las técnicas y los recursos humanos se supeditaron al desarrollo y perspectiva de la ingeniería civil, geofísica e hidráulica; las directrices de planeación y la tecnología empleada (inicialmente vinculada con la extracción petrolera) partieron de las instituciones desde las cuales se gestionó el recurso: Comisión Nacional de Irrigación, Secretaría de Recursos Hidráulicos, Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, Comisión Federal de Electricidad. Los patrones de crecimiento en esta gran etapa sujetaron el aprovechamiento del agua subterránea al desarrollo de la agricultura como columna vertebral y desde entonces se sentaron los preceptos más relevantes en materia de aguas en el artículo 27 constitucional. El cambio en la orientación del crecimiento se expresó en una serie de descuidos relativos al desarrollo hidrogeológico y su expresión en el manejo. La Comisión del Plan Nacional Hidráulico de la República Mexicana (1976) operó el giro teniendo como antecedentes la generalización del empleo de agua subterránea para abastecer a grandes poblaciones; el incremento en la participación de privados en las perforaciones; la presión por contar con inventarios de aguas subterráneas más que con estudios hidrogeológicos; la competencia internacional por la explotación de recursos hídricos; los intereses hidráulicos y de desarrollo urbano aplicados desde la creación de la Comisión de Aguas del Valle de México.

Conclusiones.

La viabilidad y éxito de las políticas hídricas -en cuanto a garantizar agua para la salud, productividad, sustentabilidad y calidad de vida- requiere llevar a cabo el reconocimiento de la innovación científica y tecnológica y su aplicación. En el sentido de que al conjunto de objetivos de exploración, captación y explotación del agua subterránea en las zonas áridas y semiáridas en los cuales se centró en sus albores la geohidrología[3] debe sumarse el reconocimiento de nuevos campos -tan importantes como aquellos- que se han ido sumando y conformando la emergencia de la

Hidrogeología como ciencia y como técnica para enfrentar los retos en materia de agua: a) evolución desde el concepto de acuífero al de sistema acuífero b) revolución conceptual en los estudios de rocas fisuradas anteriormente consideradas como "impermeables; c) aplicación de marcos conceptuales más complejos en la simulación numérica del flujo de agua, d) incorporación del progreso en las técnicas hidrogeoquímicas como herramienta de estudio que refuerza el conocimiento de las hidrodinámicas; e) la demostración de una exigencia reconocida a nivel mundial de mayor rigor y disposición de información adecuada y fiable para la determinación del balance de agua y la propuesta de alternativas en los casos en que no sea posible obtenerlas. En resumen: f) el reconocimiento y la determinación científica del agua subterránea como agente geológico y su interacción con el medio ambiente.

REFERENCIAS

- Arreguín Mañón, J.P., Aportes a la Historia de la Geohidrología en México 1890-1995) México: CIESAS; Asociación Geohidrológica Mexicana, A.C., 1998.
- Blázquez, Luis, "Hidrogeología de las regiones desérticas de México", Anales del Instituto de Geología, t. XV, 1959. (citado por Arreguín)
- Carrillo-Rivera, J.J., "Entorno hidrogeológico de San Luis Potosí" en Price, M. Agua Subterránea. México, Ed. Limusa. Noriega Editores, 2003.
- Price, M., Agua Subterránea; Editorial Limusa, México, 2003.
- Tóth, J. 2000. "Las aguas subterráneas como agente geológico: causas, procesos y manifestaciones". Boletín Geológico y Minero. Vol. 111, No. 4. pp. 9-26.

[1] Realizados con base a una investigación llevada a cabo por el Dr. Joel Carrillo-Rivera y el Dr. Antonio Cardona (Carrillo-Rivera y Cardona, 2003).

[2] El descubrimiento del concepto de continuidad hidráulica entre los 50's y 80's se ha ido perfeccionando y constituye una conclusión tanto de la hidrogeología como de la hidráulica de pozos a nivel internacional.

[3] La Hidrología Subterránea es una rama encuadrada en las Ciencias de la Tierra, implica el reconocimiento de la parte subterránea del ciclo del agua y el reconocimiento del intercambio continuo entre aguas superficiales y aguas subterráneas, motivo por el cual su cuasi sinónimo es la Hidrogeología. Toma conocimientos y se vincula con una gran multitud de otras ramas del saber (química, física, biología, geomorfología principalmente) -cada vez más- y penetra profundamente en los campos de la Ingeniería, de la Economía, de la Sociología y del Derecho. Desde hace un par de décadas se viene configurando más claramente la figura del Hidrólogo de Aguas Subterráneas, al que -modificando quizás algunos matices- también se le puede llamar Hidrogeólogo o Geohidrólogo, según el mayor o menor énfasis en los aspectos geológicos o cuantitativos.

Autor(es): Dora A. Romero Olivera