

10º Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos
Sesiones Generales: “Energía y Sociedad, aliados inseparables”

SISTEMAS ACUÍFEROS Y MODELOS HIDROGEOLÓGICOS CONCEPTUALES: HERRAMIENTAS DE EVALUACIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS PARA USO SOSTENIBLE EN UPSTREAM. EJEMPLOS

Gabriel Meconi¹

1: YPF Tecnología S.A. (Y-TEC) y Universidad de Buenos Aires

gabriel.r.meconi@ypftecnologia.com, gmeconic@yahoo.com

Keywords: sistema acuífero, modelo hidrogeológico conceptual, uso sostenible, SANeRa

ABSTRACT

Aquifer Systems and Hydrogeologic Conceptual Models: evaluation tools of hydric resources for sustainable use in Upstream. Examples

Water is a strategic resource to explore and produce hydrocarbons.

The study of groundwater resources to characterize/ define “aquifer systems” and the elaboration of hydrogeologic conceptual models that allow their knowledge, are the main tools to understand the hydrogeology of any region. When the zone is more arid and its geology more complex, the systems are more difficult to understand and thus the models to elaborate. When more data and results are obtained and evaluated systematically with experience in hydrogeologic conceptual models, they are elaborated with increasing certainty and detail. With them, decisions can be taken with more certitude from the points of view of the “sustainable use of the resource” and the “environmental” one, applying the paradigm of Integrated Water Resource Management (IWRM), within the Sustainable Development. If there is not a previous hydrogeologic conceptual model, it is impossible to make a mathematical model for simulation, because there is not a reliable base to elaborate it.

The characterization and definition of an aquifer system should have its classic components: aquifers themselves (porous, high to medium permeability), aquitards (porous, low permeability), aquicludes (porous, impermeable), aquifuges (nonporous, impermeable), fractured aquifers (originally may have been aquicludes/ aquifuges, but by fracturing they have transformed in aquifers due to secondary porosity and permeability); recharge, circulation and discharge areas; flow systems of different scales (regional, subregional, local). When the knowledge reached allows it, they may include: hydrogeochemistry zonations, evolution with groundwater flow and increasing depth, isotopic characterization, origins and ages of water.

The characterization of aquifer systems and hydrogeologic conceptual models allow to elaborate maps and vertical sections useful as tools to make decisions. If the studied region/ zone of an aquifer system is large and variable, there may be differences between distinct areas, each of them having a particular hydrogeologic conceptual model, compatible with the regional one. There may be zones where the aquifer system acts in general as one complex flow unit, and others where it is compartmentalized: divided by aquicludes (“seals”) and/or aquitards (“semiseals”) which allow to discriminate distinct bodies/ thicknesses with different characteristics.

If the knowledge reached and the data/ results are enough, hydrogeologic conceptual models can be expressed in Petrel or Sahara format or similar, allowing to be managed with friendly tools by geologists and other professionals of hydrocarbon industry not specialists in hydrogeology.

Examples of aquifer systems and hydrogeologic conceptual models from argentine hydrocarbon basins in arid/ semiarid regions are presented, with different levels of knowledge and scales.

INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso estratégico para explorar y producir hidrocarburos.

En su excelente trabajo de 1980 en el que relaciona petróleo y agua subterránea, Tóth comienza citando a Muskat (1932). Se resume dicha cita en traducción libre del hidrogeólogo autor del presente trabajo (que fue geólogo petrolero pocos años en el inicio de su carrera profesional): “Indudablemente la gente en la industria petrolera encontrará mucho que aprender al familiarizarse con el trabajo y la cooperación con aquellos interesados más particularmente en la hidrología donde el abordaje científico al problema ha sido un axioma de larga data”. Se puede parafrasear que la inversa es exactamente igual de válida: lo mucho que aprendemos y nos enriquecemos los hidrogeólogos trabajando con geocientistas petroleros.

En efecto, agua e hidrocarburos son fluidos almacenados y transmitidos en el subsuelo por sistemas porosos permeables, y si bien cada especialidad tiene su propio arte, ambas comparten más paradigmas de los evidentes.

La frase en cursiva que abre esta Introducción puede resultar obvia para los que trabajamos en esta industria, principalmente en el Upstream, pero es necesario explicitarla sobre todo desde que, en los últimos años, el rápido desarrollo de los Reservorios de hidrocarburos No Convencionales (RNC), que requieren importantes volúmenes de agua para su fracturación hidráulica, resaltan la gran importancia del agua como recurso estratégico.

Este trabajo hace hincapié en el agua subterránea como “recurso natural a estudiar para ser utilizado en forma sustentable”, dentro del Desarrollo Sostenible aplicando uno de sus paradigmas: la Gestión Integrada de Recursos Hídricos (GIRH; Integrated Water Resource Management, IWRM; GWP 2000), la cual aún es incipiente en la Argentina entonces debe ser impulsada.

El estudio de los recursos hídricos subterráneos para caracterizar y definir “sistemas acuíferos” y la elaboración de modelos hidrogeológicos conceptuales que permitan su entendimiento, son herramientas fundamentales para comprender la hidrogeología de cualquier región. Cuanto más árida es la zona y más compleja su geología (características típicas de las cuencas petroleras argentinas), más difíciles son de entender y definir los sistemas acuíferos y de elaborar los modelos hidrogeológicos conceptuales. A medida que se va estudiando una región o zona y se van obteniendo más datos y resultados, analizándolos y evaluándolos sistemáticamente con experiencia en modelos hidrogeológicos conceptuales, estos se van elaborando con crecientes grados de certeza, de escala y de detalle, y en distintos tipos de presentaciones/ formatos. Con ellos se pueden tomar decisiones con mayor certidumbre e integralmente desde los puntos de vista “del uso sostenible del recurso” y “ambiental”, aplicando el paradigma internacional de la GIRH.

En este trabajo primeramente se presentan conceptos generales, otros detallados, y algunos aspectos metodológicos, sobre sistemas acuíferos y modelos hidrogeológicos conceptuales, con la intención de contribuir al enriquecimiento interdisciplinario con profesionales de la industria

hidrocarburífera, principalmente geocientistas e ingenieros de reservorios. Y posteriormente se ejemplifica con su aplicación en dos sub-regiones de la Cuenca Neuquina.

La temática es muy amplia, por lo tanto este trabajo es una modesta contribución de la experiencia del autor, muy perfectible y completable con los aportes de colegas tanto desde la hidrogeología como desde las geociencias en general y la geología del petróleo.

En los últimos años vienen publicándose algunos trabajos hidrogeológicos relacionados directamente con la industria petrolera que conceptualizan sistemas acuíferos y/o modelos hidrogeológicos conceptuales. Algunos ejemplos son: Hernández *et al.* 2016; Meconi 2015, 2016; Meconi *et al.* 2016, y otro en prensa. Y cada vez son más comunes los trabajos hidrogeológicos internos realizados por geocientistas de las propias empresas petroleras, y/o encargados por éstas a servicios de consultoría externa, aunque en general con objetivos focalizados en “lo ambiental” relacionados con la protección de acuíferos de baja salinidad con cañerías guía e intermedia (para cumplir con las normas provinciales) pero no tanto para caracterizar al recurso hídrico subterráneo para su potencial uso sostenible para explorar y producir hidrocarburos.

SISTEMAS ACUÍFEROS

Siguiendo la definición del United States Geological Service, USGS (Laney y Davidson 1986), a su vez basada en Poland *et al.* (1972), en traducción libre del autor levemente modificada, un sistema acuífero es “un cuerpo heterogéneo de materiales permeables y poco permeables (acuitardos) e impermeables (acuicludos y/o acuífugos) intercalados, que funciona regionalmente como una unidad hidráulica que almacena y produce agua; comprende dos o más acuíferos (capas o conjuntos de capas permeables) separados al menos localmente por acuitardos (unidades semi-confinantes) y/o acuicludos (unidades confinantes), que dificultan y/o impiden el movimiento del agua subterránea pero no afectan en gran medida la continuidad hidráulica regional del sistema”.

Dicha definición incluye la aclaración de que “la jerarquía de ‘acuífero’ y ‘sistema acuífero’ y sus nombres puede no siempre ser consistente en la práctica. Debido a diferencias en las escalas de investigación, acuíferos individuales pueden estar combinados en un sistema acuífero simple, que puede ser además parte de otro sistema acuífero dentro de un área más amplia. Los autores tienen la responsabilidad de explicar estas relaciones claramente con tablas comparativas y descripciones en el texto”.

Lo anterior está en consonancia con la definición del Instituto Geológico y Minero de España, IGME (Navarro Alvargonzález *et al.* 1993), que agrega: “el concepto de sistema es dinámico, ya que las ‘unidades prácticas’ cambian en el tiempo al haber cambios económicos, avances en la investigación, etc.; no es de extrañar, por tanto, que puedan existir críticas a cualquier clasificación rígida de los materiales permeables en ‘sistemas hidrogeológicos’ o ‘sistemas acuíferos’”.

MODELOS HIDROGEOLÓGICOS CONCEPTUALES

La elaboración de modelos hidrogeológicos conceptuales es uno de los temas más importantes y apasionantes dentro de la hidrogeología. Pueden ser relativamente sencillos de elaborar en regiones húmedas (al menos en los primeros metros de profundidad; se complejizan a mayores profundidades). Pero cuanto más árida es la región y cuanto más compleja su geología, más difíciles son de elaborar. Si no se tiene previamente un modelo hidrogeológico conceptual, no se puede elaborar ningún modelo matemático para simulación que sea mínimamente coherente, pues no se tiene una base con cierta certeza sobre la que plantearlo.

Los modelos hidrogeológicos suelen ser presentados conceptualmente como secciones verticales idealizadas y/o como bloques diagramas, que presenten los principales componentes de los “sistemas acuíferos”: acuíferos, acuitardos, acuicludos, acuífugos, acuíferos fisurados; áreas de recarga, circulación y descarga; sistemas de flujo de distintas escalas (regional, subregional, local). Cuando el nivel de conocimiento alcanzado lo permite, se incluyen: zonificaciones hidroquímicas, evolución hidroquímica en el sentido del flujo subterráneo y al aumentar la profundidad; caracterizaciones isotópicas, orígenes y edades del agua; etc.

Dichas secciones verticales idealizadas y/o bloques diagramas, son la síntesis de múltiples secciones verticales verdaderas combinando su análisis y evaluación con todos los tipos de mapas enumerados más adelante (y otros posibles), y por lo tanto las secciones verticales verdaderas y los mapas son parte de los modelos hidrogeológicos conceptuales, siendo herramientas concretas para tomar decisiones. Cuando la región de estudio es extensa y cambiante de una zona a otra, hay variaciones entre estas zonas y por lo tanto es ideal que cada una diferenciable tenga un modelo hidrogeológico conceptual en particular diferente, pero compatible con el regional o subregional, al que pueden ir modificando. Así puede haber zonas donde los sistemas acuíferos actúan de forma más parecida a una unidad de flujo complejo, y otras donde están más “compartimentados” con acuicludos (“sellos”) y/o acuitardos (“semisellos”) que permiten discriminar distintos paquetes/ espesores con distintas características hidrogeológicas. Se recomienda usar términos hidrogeológicos: acuicludo y acuitardo; no “sello” ni “semisello”, pues tienen connotación petrolera.

En la medida en que el grado de conocimiento alcanzado y los datos/ resultados son suficientes, los modelos hidrogeológicos conceptuales se pueden representar en formatos típicos usados en el Upstream de la industria hidrocarburífera, como Petrel o Sahara o similares, dando entonces la posibilidad de manejarlos con herramientas más amigables y útiles para los geólogos operativos/ de desarrollo, ingenieros y otros profesionales de los yacimientos. En los formatos mencionados, el análogo hidrocarburífero es el “modelo estático del sistema petrolero”, sólo que se está trabajando con modelos hidrogeológicos conceptuales de “sistemas acuíferos”, que tienen grandes diferencias con los “petroleros”.

Base de Datos Hidrogeológicos, trabajos para nutrirla de información, y mapas recopilados

Una base de datos hidrogeológicos consta de todo tipo de mapas e información relacionados con la geología, el agua subterránea y superficial: producida por trabajos hidrogeológicos ad hoc; y recopilada de diversas fuentes, muchas de ella de origen hidrocarburífero. Cuenta con todos los datos de georeferenciación (coordenadas, alturas sobre el nivel del mar, profundidades).

Las principales características hidrogeológicas/ hidrológicas que incluye, son, entre otras: ubicación precisa de las fuentes de agua; tipo de fuente: pozo “industrial” o de producción importante, pozo “pequeño” tipo casero o de pequeño productor, manantial, vertiente, aguada natural, aguada excavada, aguada natural luego excavada para potenciarla; profundidad total; profundidad del Nivel Piezométrico; profundidad de techos y bases de acuíferos y/o complejos de acuíferos y/o de unidades hidrogeológicas, de acuícludos (“sellos”), de acuitardos (“semisellos”); espesores totales; espesores de acuíferos, de acuitardos y de acuícludos; caudales disponibles reales, potenciales y sostenibles; datos y parámetros hidrogeológicos/ hidrológicos como transmisividad, permeabilidad, caudales específicos, eficiencia de pozo; diagramas de entubación de los pozos; datos y parámetros hidroquímicos, calidad; estimación de recarga; etc.

De lo anterior se desprende que las muy importantes fuentes de información que se necesitan son las bases de datos de pozos hidrocarburíferos, con muy abundante y muy valiosa información antecedente, sobre todo perfiles y legajos pozos no sólo de petróleo y gas, sino también de productores de agua y de monitores y sumideros de fluidos residuales como flowback, control geológico/ descripciones de cutting, pozos tipo upholes de sísmica, secciones sísmicas, etc. Estas fuentes deben analizarse y evaluarse en detalle desde el punto de vista hidrogeológico, trabajando interdisciplinariamente con los geocientistas petroleros.

Se deben realizar trabajos hidrogeológicos ad hoc: balances hídricos; relevamientos y muestreos de campo; prospección geoeléctrica (Sondeos Eléctricos Verticales: SEV); ensayos en pozos de agua de empresas petroleras y de pobladores rurales: bombeo y recuperación, “drawdown” en pozos surgentes; análisis de laboratorio de muestras de agua; mapeos; etc.

Mapas hidrogeológicos y mapas geológicos relacionados

A partir de los mapas recopilados y la base de datos hidrogeológicos, se realizan mapas hidrogeológicos y geológicos relacionados; ejemplo de algunos de los principales y posibles:

- Mapa Hidrogeológico de superficie, con unidades hidrogeológicas “sintéticas”: cada una es el resultado de la síntesis de sus principales características geológicas (litológicas, estructurales), geomorfológicas e hidrológicas, claves para definir su comportamiento hidrogeológico.
- Mapa de Profundidad del Nivel Piezométrico (NP) o de la Superficie Piezométrica (SP) (medido desde la superficie topográfica). (Ver Nota 1 al final del trabajo.)

- Mapa Equipotencial del NP o Isopiécico, para determinar el flujo subterráneo (referido al nivel del mar, o a un plano horizontal de referencia arbitrario) (Si la cantidad/densidad de datos permite su elaboración) (Ver Nota 1 al final del trabajo).
- Mapas estructurales varios de techo y/o base de unidades litológicas y/o hidrogeológicas relevantes (referidos al nivel del mar, o a un plano horizontal de referencia arbitrario): principalmente de sistemas acuíferos y/o capas acuíferas.
- Mapas de espesores varios, por ejemplo:
 - o Espesor total: incluye capas acuíferas (permeables), acuicludas (impermeables) y acuitardas (poco permeables).
 - o Espesor acuífero acumulado total: sólo de las capas permeables.
- En estadios más avanzados, se pueden hacer mapas estructurales, espesores de subunidades de las unidades litológicas y/o hidrogeológicas relevantes, cuando discriminarlas sea útil y posible.
- Mapas de acuíferos “colgados” (o “suspendidos”): ubicados sobre el Nivel Piezométrico y por lo tanto dentro de la Zona No Saturada. Suelen ser locales, poco extensos Pueden ser relativamente abundantes/importantes en una región árida/semiárida, generando manantiales/vertientes/aguadas, que usan los pobladores del lugar: algunos de ellos son explotados para uso humano y bebida animal. Algunos podrían tener explotación sostenible para otras actividades como las del upstream y otros usos industriales como minería, etc., pero requieren monitoreos detallados y adecuada gestión (GIRH) para garantizar la sustentabilidad.
- Si se detectan capas/complejos de capas/secciones/espesores, que sean impermeables (acuicludos) o de baja permeabilidad (acuitardos), que puedan actuar como barreras de permeabilidad o “sellos” o “semisellos” (respectivamente) entre paquetes/complejos de capas acuíferas, también se los mapea, generando mapas estructurales y espesores.
- Mapas hidroquímicos varios (discriminando en lo posible distintos “paquetes”/acuíferos/complejos de acuíferos/secciones/espesores, para caracterizarlos separadamente); ejemplos:
 - o Salinidad total (Sólidos Disueltos Totales=SDT).
 - o Algunos iones mayoritarios en particular.
 - o Algunas relaciones iónicas en particular.
 - o Algunos elementos/compuestos, que restrinjan/impidan la calidad/uso para agua potable y/o irrigación y/u otros usos.
- Mapas de porosidad: En estadios avanzados, con datos suficientes, se realizan mapas de porosidad de unidades/subunidades hidrogeológicas, y al multiplicarlos matemáticamente con los de espesor acuífero acumulado total (o permeable), se obtienen los siguientes:
- Mapas de altura equivalente de columna/lámina de agua, que son verdaderos “mapas de reservas de agua subterránea”, pues al integrar matemáticamente en el área que ocupan, brindan los volúmenes de reservas de agua, y sirven para planificar/gestionar su uso sostenible.

Para poder elaborar los dos últimos tipos de mapas, se recomienda correr perfiles de porosidad no sólo en los tramos de interés petrolero, sino también en profundidades someras antes de entubar la cañería intermedia/ guía, donde suelen estar los acuíferos explotables. Además, las curvas de porosidad “Densidad-Neutrón” permiten interpretar la profundidad del Nivel Piezométrico pues el efecto en las capas permeables de la Zona No Saturada, que poseen aire, es similar al de los reservorios con gas: ambas curvas se cruzan inversamente (ver ejemplos más adelante).

Todos estos mapas constituyen herramientas de gran utilidad cotidiana en los yacimientos, pues, desde el punto de vista “del recurso”, cada vez que se necesita agua para cualquier uso se sabe a qué profundidad estimada se encontrará, qué espesor acuífero total explotable estimado habrá, qué calidad hidroquímica general tendrá el agua, qué restricciones generales en cuanto a la calidad es posible que tenga el agua, etc. Y desde el punto de vista “ambiental” sirven para detallar y ajustar las profundidades de protección con cañerías guía e intermedia en cada sitio en particular, las ubicaciones y profundidades ideales de pozos de monitoreo al lado de pozos inyectores de fluidos residuales (por ejemplo: flowback de fracturación de reservorios no convencionales, la vulnerabilidad a la contaminación, etc.). Ambos puntos de vista, el “del recurso utilizable sustentablemente” y el “ambiental”, mediante la GIRH contribuyen al Desarrollo Sostenible.

EJEMPLO 1: CENTRO DE LA CUENCA NEUQUINA

El Grupo Neuquén y las facies clásicas de la Formación Rayoso (sección superior: “Rayoso clástico”) son sedimentitas continentales del Cretácico, ampliamente aflorantes y presentes en el subsuelo de la Cuenca Neuquina (Fig. 1). El desarrollo de los Reservorios de hidrocarburos No Convencionales (RNC), que requieren importantes volúmenes de agua para su fracturación hidráulica, resalta la importancia del estudio del “Sistema Acuífero Grupo Neuquén y Formación Rayoso”, “S.A.Ne.Ra.”, sistematización y denominación propuestas por Meconi (2015, 2016). Es un importante complejo de areniscas y conglomerados interconectados; localmente separados por “acuitardos” y “acuicludos” (ambos conceptos definidos anteriormente). Si bien desde el punto de vista hidrocarburífero el Grupo Neuquén y la Formación Rayoso suelen ser diferentes, desde el punto de vista hidrogeológico el SANeRa cumple con las definiciones de “sistema acuífero” (Laney y Davidson 1986; Poland *et al.* 1972; Navarro Alvargonzález *et al.* 1993), y no sólo se los puede considerar parte del mismo sistema sino que conviene hacerlo así pues a nivel regional constituyen una misma unidad hidráulica compleja y responden en general a un único nivel piezométrico (con excepciones por su complejidad). La caracterización que se resume a continuación ilumina esta conveniencia (ver detalles en Meconi 2015, 2016; Bedini y Meconi 2015; Bitesnik *et al.* 2002).

Los antecedentes hidrogeológicos (Primo y González 1973; Sosic 1978; Laurencena y Kruse 2008; Colombino y Luengo 2011; Scatizza *et al.* 2013; Hernández 2015) no conceptualizan a estas rocas como “sistema acuífero”. Su sistematización contribuye a su explotación sustentable

mediante la Gestión Integrada de Recursos Hídricos (GIRH), dentro del Desarrollo Sostenible, por aumento de la oferta hídrica en una región árida/semiárida (déficit hídrico aproximado de 600 mm/año), pues tiene gran potencial para todas las actividades, no sólo la hidrocarburífera. Ya a fin de la década de 1960 y principios de los 70, en informes y legajos de pozos exploratorios de hidrocarburos del Bajo de Añelo y cercanías, geólogos petroleros destacaban la surgencia de agua subterránea de estas rocas con altos caudales y presiones, y resaltaban que al ser de baja salinidad relativa, podría utilizarse para emprendimientos agrícolas con alto impacto socioeconómico positivo.

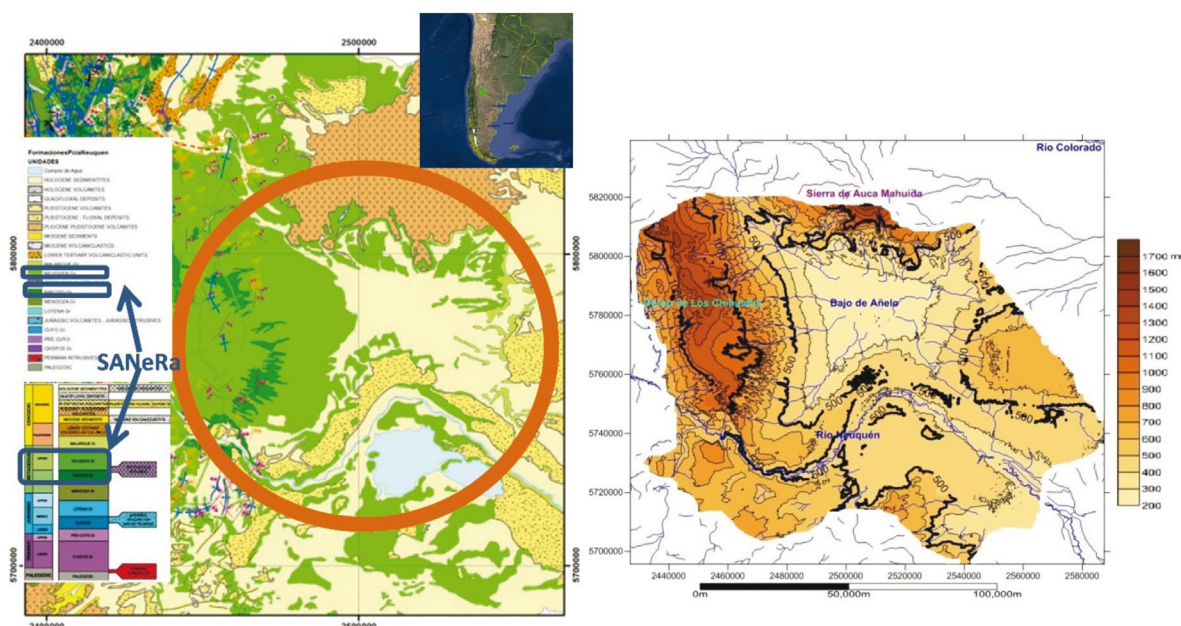


Figura 1. Ubicación del área estudiada del Sistema Acuífero Grupo Neuquén y Formación Rayoso (SANeRa) en Mapa Geológico (izquierda), y Mapa Topográfico (derecha)

En un trabajo de 2002 para la industria hidrocarburífera (Bitesnik *et al.* 2002) en una zona cercana al área aquí estudiada, el autor del presente trabajo comenzó con la sistematización de este sistema acuífero. Y a partir de trabajos realizados desde 2011 al presente y que deben continuar, profundizó la sistematización en el estudio del SANeRa proponiendo esta denominación original (Meconi 2015, 2016); para que surja con más evidencia, además de los argumentos técnicos, conviene comenzar toda propuesta de sistematización con una denominación adecuada que la explicita. Estos trabajos desde 2011 se focalizan en un área del centro de la cuenca de aproximadamente 13.000 km² (Fig. 1), donde se concentra el desarrollo de los RNC: entre el Dorso de los Chihuidos (W, 1300 msnm), la Sierra Auca Mahuida (N, 1700 msnm), el Río Neuquén (SW, S y SE) y el Bajo de Añelo (centro y E, 220 msnm). El presente ejemplo, junto con otras publicaciones (Meconi 2015, 2016; Bedini y Meconi 2015), es un resumen de dichos trabajos, donde se insiste con

la sistematización del SANeRa e intenta generar un corpus de conocimiento que se enriquezca también con aportes de otros autores recientes (Alonso 2016; Alonso *et al.* 2016; Bertoni y Dufilho 2016; Gatica y Dufilho 2016) y con varios de los antecedentes citados en el párrafo anterior. Aunque los mismos no lo hayan conceptualizado específicamente como un sistema acuífero, las coincidencias entre varios trabajos realizados en forma independiente unos de otros refuerza la idea de integrar un corpus de conocimiento.

Contribuir con un corpus de conocimiento del SANeRa que se enriquezca cada vez más está en línea con lo que varias empresas petroleras encararon recientemente y continúan realizando: estudios hidrogeológicos tanto para atender a regulaciones ambientales e hídricas de la Provincia de Neuquén, como para satisfacer sus necesidades de agua como recurso estratégico para la exploración y explotación de hidrocarburos, mediante la creciente fracturación de RNC. En efecto, un reciente artículo en el Journal of Petroleum Technology (Rassenfoss 2018) menciona a un consorcio formado por varias empresas para “desarrollar regulaciones bien definidas sobre cómo avanzar en solicitudes de permisos para producir fuentes de agua” alternativas a las del Río Neuquén que ya se utilizan, pues los bloques alejados del río “necesitan identificar otras fuentes” de agua. El artículo destaca que “las operadoras han empezado a preocuparse sobre la necesidad de más ... agua... Encontrar agua para fractura ... es otra potencial barrera al crecimiento...”.

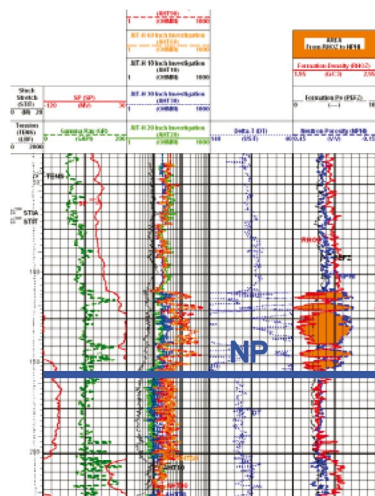
En base a la descripción de la muy alta potencialidad de explotación sostenible de agua subterránea del SANeRa que se presenta en este trabajo, se agrega a lo que menciona el artículo antes citado, que futuros pozos productores de agua (concebidos con criterios hidrogeológicos desde su diseño, que les den alta productividad) ubicados estratégicamente muy cercanos a (o al lado de) los pozos de RNC a fracturar, mejorarían enormemente la eficiencia y los costos de transporte de agua y su disponibilidad, porque no sólo disminuiría o hasta eliminaría la necesidad de infinidad de camiones sino también reduciría los acueductos a longitudes mínimas.

Se destaca que se contó con evaluaciones petrofísicas de perfiles de pozos hidrocarburíferos (con muchos más registros que los utilizados rutinariamente en hidrogeología) realizadas por empresas petroleras, focalizadas en las rocas del SANeRa, o sea a menores profundidades que las zonas de interés hidrocarburífero, para caracterizar los acuíferos con visión hidrogeológica. Junto a más información de origen petrolero, se aprovechó en forma óptima tecnología muy difícilmente disponible cuando sólo se estudia agua subterránea, obteniéndose resultados integrales más ricos. Esta óptima interacción fue posible pues varios de los trabajos hidrogeológicos ad hoc se ejecutaban al mismo tiempo que los rutinarios en la exploración y explotación de hidrocarburos.

Nivel Piezométrico del Sistema Acuífero Grupo Neuquén y Formación Rayoso (SANeRa)

El Nivel Piezométrico (NP) en el área estudiada es sub-horizontal, y se encuentra entre 300 y 350 msnm, inclinando muy suavemente en general de Oeste a Este y de Norte a Sur, desde las

principales áreas de recarga local (Dorso de los Chihuidos y Sierra Auca Mahuida) hacia el Bajo de Añelo. Se lo mide en forma directa en los escasos pozos de explotación de agua del área. También se interpreta su profundidad en perfiles de pozos hidrocarburíferos, con más precisión con las curvas “Densidad-Neutrón”, pues las capas permeables de la zona no saturada tienen aire en sus poros, entonces las curvas se cruzan inversamente, como en los reservorios con gas (Figs. 2 y 3).



Cota topog.: 498 msnm

Cruce D/N: 155 mbbp

Nivel Piez. ≈ 343 msnm

Figura 2. Nivel Piezométrico (NP) interpretado de Neu-Den en pozo petrolero (NW de área estudiada): cruce de curvas (naranja) marca base de zona no saturada.

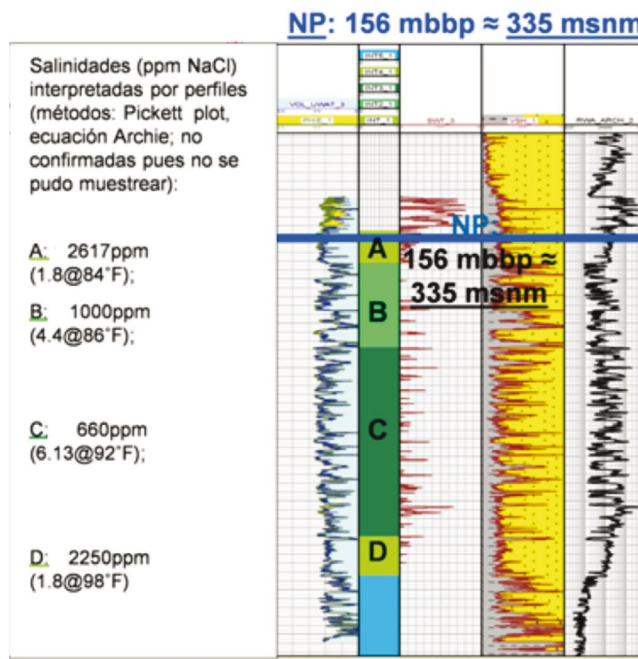


Figura 3. NP como en Fig.2. Y salinidad interpretada por petrofísica de perfiles en pozo petrolero (centro-W de área estudiada): “anomalía de salinidad interpretada”: disminuiría al aumentar la profundidad.

También se interpreta el NP de mediciones de presión en boca de pozos de agua surgentes, y en pozos petroleros corriendo la sonda “MDT” (“Modular Formation Dynamics Tester”) o similar.

Los importantes desniveles topográficos hacen que el NP esté a profundidades de cientos de metros o que sea surgente. En la sección de 120 km de longitud de la Fig. 4 se ve la importante variación de profundidad según la topografía, y el muy suave gradiente del NP desde las áreas de recarga (Dorso de los Chihuidos, Sierra Auca Mahuida) hacia el área de descarga: Bajo de Añelo (ver también mapa topográfico en Fig. 1). En la Fig. 5 (intersección del NP con la superficie topográfica) se presentan en celeste las áreas donde el NP es surgente, comprobado en al menos 7 pozos y en muchas observaciones de surgencia en aguadas y en antiguos pozos upholes de sísmica, principalmente en el Bajo de Añelo. El agua puede surgir con una columna que alcanzaría más

de 100 m de altura sobre la superficie topográfica. (Ver también más adelante.) En la Fig. 5 se representa también la profundidad probable a la que se encontraría el NP en áreas no surgentes, en metros referidos a la superficie topográfica (mst). (Ver Nota 1.)

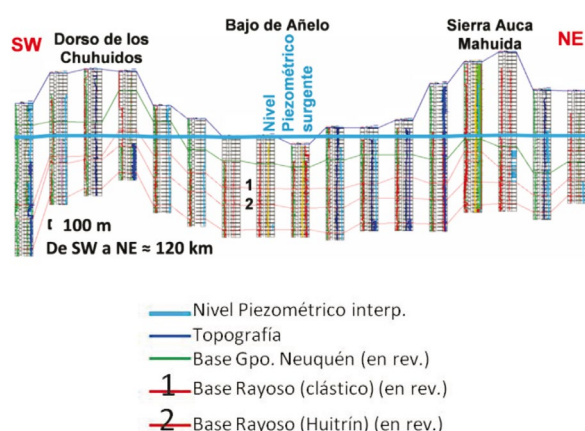


Figura 4. Sección SW-NE con perfiles de pozos hidrocarburíferos. SANeRa desde topografía hasta base de Rayoso clástico. NP subhorizontal surgente en Bajo de Añelo (ubic. en Fig. 5)

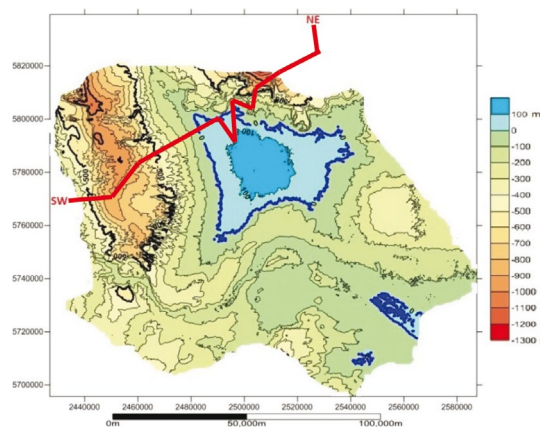


Figura 5. Probabilidad de surgencia de agua: >0m (celestes); y profundidad estimada del Nivel Piezométrico (verdes, marrones, rojos): <0m. (Respecto a superficie topográfica: ver Nota 1.) Línea roja: sección de Fig. 4.

Caracterización hidráulica del SANeRa, parámetros hidrogeológicos y de pozos

En un pozo de explotación de agua de una empresa petrolera, denominado “pozo CB” (Con Bomba) para esta publicación, en el sector centro-oeste del área de estudio (al SW del Bajo de Añelo y fuera del mismo) con la boca de pozo (bp) a 394 msnm, se realizaron ensayos de bombeo a caudal constante, a caudales escalonados y de recuperación. El 1° duró 53 horas, con los siguientes resultados: caudal (Q)=56 m³/h (más de 1300 m³/d); nivel estático (NE)=49 mbbp (345 msnm); nivel dinámico final (ND)=109 mbbp; depresión del NP (d)=60 m; caudal específico (Q_e)=0,95 m³/h.m; transmisividad (T)=47 m²/d (=m³/d.m) (por método de Jacob); descenso residual a 17 horas de recuperación=0,45 m. Explota capas acuíferas y acuitardas de pocos metros de la base del Gpo. Neuquén y principalmente del Rayoso clástico, con 77 m de filtros en 8 tramos entre 88 y 354 mbbp. Con el ensayo a caudales escalonados de 37,5, 49,4 y 59 m³/h, se calculó la eficiencia del pozo: 81%; y se obtuvieron las curvas características Q - d y Q_e - d , que junto con el control geológico de cutting y el perfilaje geofísico indican que se trataría de un sistema acuífero multicapa cuyas capas superiores serían libres, siguiendo capas semiconfinadas a confinadas a medida que aumenta la profundidad. Habría comunicación hidráulica entre las capas, irregularmente separadas por acuitardos y acuicludos; son de origen fluvial, los acuíferos se comunican a través de las facies poco permeables (acuitardos) que junto con las impermeables (acuicludos) pueden estar erosionadas por facies permeables de canales que se amalgaman en

unidades hidráulicas mayores, esto se observa en afloramiento y se interpreta en subsuelo.

La surgencia en el Bajo de Añelo permite realizar ensayos en pozos de agua surgentes de empresas petroleras. En uno denominado “pozo S” (“Surgente”) para este ejemplo, en el sector nor-noreste del Bajo de Añelo, con boca de pozo a 233 msnm, se realizaron dos tests (en jerga petrolera podrían denominarse “drawdown”) a caudal constante. Cada test duró unos 15 minutos (imposible prolongarlos debido a operatividad restringida: surgencia con alta presión, etc.). Se obtuvieron los siguientes resultados: $Q=126 \text{ m}^3/\text{h}$ (más de $3000 \text{ m}^3/\text{d}$); presión estática inicial en $bp=8,8 \text{ bar}$ (se mantiene luego de 15 ó 20 años de explotación) equivalente a $NE=90 \text{ msst}$ (metros sobre superficie topográfica), aprox. 320 msnm; presión dinámica durante producción con válvula totalmente abierta en $bp=6,9 \text{ bar}$ equivalente a $ND=70 \text{ msst}$, aprox. 300 msnm; disminución de presión en $bp=1,9 \text{ bar}$, equivalente a depresión del NP (d) $\approx 20 \text{ m}$; la presión se recupera inmediatamente luego de cerrada la válvula; $Q_e=6,4 \text{ m}^3/\text{h.m}$; $T=330 \text{ m}^2/\text{d}$ ($=\text{m}^3/\text{d.m}$) (método de Jacob). Explota capas acuíferas del Gpo. Neuquén, con filtros entre 360 y 423 mbbp. La eficiencia del pozo se estimó en 50%. La interpretación de la prognosis del pozo (correlaciones de perfiles de pozos hidrocarburíferos) indica que se trataría de un sistema acuífero multicapa similar al descrito en el pozo CB.

En el Bajo de Añelo en otro pozo surgente, “pozo SS” en este ejemplo, se hizo un test similar de 46 minutos (no pudo prolongarse por operatividad restringida), en el que se interpretó una T de $700 \text{ m}^2/\text{d}$ ($=\text{m}^3/\text{d.m}$), que sólo es indicativa y se relativiza por mayor incertidumbre que las anteriores.

Salinidad del agua del SANeRa

Los análisis de laboratorio de muestras de agua de los 3 pozos citados indican que es agua de baja salinidad relativa pero salobre pues supera los 1500 mg/l de Sólidos Disueltos Totales (SDT) y por lo tanto no es apta para “abastecimiento de poblaciones” (el Código Alimentario Argentino considera “agua potable” hasta dicho valor); y dependiendo de sus características iónicas, podría no ser apta para “irrigación”. El decreto 1483/12 de la Prov. de Neuquén restringe con ambos usos la utilización de agua subterránea para reservorios no convencionales (RNC). Entonces la rápida generalización que en ocasiones se hace sobre que el agua subterránea no puede ser utilizada en RNC se relativiza ante estos resultados que la caracterizan como salobre no apta para consumo humano y/o irrigación en varios sitios del área estudiada. En otros sitios el agua del SANeRa tiene menor y mayor salinidad. Todo esto resalta que debe evaluarse concretamente en cada caso si entra o no en la restricción del decreto mencionado, no siendo válido generalizar sin datos concretos.

En la Fig. 3 se presenta un ejemplo de salinidades de agua del SANeRa interpretadas por petrofísica a partir de perfiles en un pozo petrolero del área estudiada. Se observa que, al contrario de lo que normalmente se espera (aumento de mineralización con la profundidad), se trataría de

una “anomalía de salinidades interpretadas” pues disminuirían al aumentar la profundidad. Este hecho fue interpretado de forma similar en otro sitio del área estudiada; se destaca que en ambos casos son salinidades sólo interpretadas, o sea son datos indirectos, no confirmados por análisis de laboratorio pues no se pudo muestrear; lo cual indica la gran importancia del muestreo para tener datos directos. Lo ideal sería tomar muestras en pozos de agua mediante técnicas hidrogeológicas clásicas: bombeo y/o utilización de muestreadores tipo bailer o similares.

También se pueden usar herramientas de muestreo de reservorios de hidrocarburos, como el MDT o similar, aunque con mayor incertidumbre sobre su representatividad pues no siempre puede asegurarse el bombeo previo total del fluido de perforación que invadió el acuífero. Cuando no hay posibilidad de muestreo directo de agua subterránea, es una opción válida sin perder de vista la probable incertidumbre antes señalada. En los últimos tiempos, en pozos de hidrocarburos antes de entubar y cementar las cañerías guía e intermedia, se está usando cada vez más esta herramienta para muestrear acuíferos, en general aceptables en cuanto a su representatividad, dando resultados en cierta forma similares a los de los 3 pozos de agua señalados.

Para disminuir la incertidumbre, debería tenderse a tomar muestras de agua de pozos productores de agua o de monitoreo, con las técnicas hidrogeológicas clásicas antes mencionadas.

La percepción humana entre agua salobre y dulce varía con las costumbres en distintos contextos culturales y sociales, y está “comprobado que el hombre puede consumir agua que contenga hasta 2500 mg/l de sales sin quebranto para su salud” (Catalán Lafuente 1981). Esto explica en parte que el agua salobre sea a veces utilizada en sitios de zonas áridas/semiáridas como ésta debido a la escasez general de recursos hídricos, haciendo comprensible entonces también la existencia de los pequeños oasis en esta región (ejemplo: la pequeña localidad de Aguada San Roque, con agua surgente tanto naturalmente por la superficie del terreno como por pozos antiguamente petroleros reconvertidos a productores de agua, uno de ellos es el pozo SS mencionado en este trabajo), que podrían potenciarse mucho si existiera mayor oferta hídrica aunque el agua sea salobre, pues de hecho es utilizada por el hombre para sus actividades.

Estimación de reservas del SANeRa

En el área de estudio, a partir de un mapa estructural de un horizonte sísmico cercano al contacto Rayoso/Centenario(?) (con control parcial de pozos) provisto por una empresa petrolera, se estimó el espesor acuífero acumulado total mínimo (es decir, sin considerar las capas acuitardas=poco permeables, y acuícludas=impermeables) del SANeRa con salinidad relativamente baja (agua salobre) y con potencial de explotación sustentable.

Si se calcula la “altura equivalente de columna/lámina de agua” que se obtiene al considerar ese espesor acuífero acumulado total mínimo estimado (mínimo pues es una estimación conservadora) multiplicado por una porosidad de 20% (valor también conservador pues se tienen datos de

porosidad de más de 20% y hasta 30%), se puede estimar el volumen de agua subterránea. Se obtienen así, en los 13.000 km² del área estudiada, reservas de agua subterránea del SANeRa muy elevadas: un total mínimo del orden de 600.000 hm³ (hectómetros cúbicos; = 600.000 MMm³, millones de m³ en jerga petrolera), primera estimación expeditiva.

Téngase en cuenta que si en un pozo de RNC se utiliza una media aproximada de 20.000 m³ (veinte mil) de agua para fracturación hidráulica, el uso para dicha actividad de sólo el 1% (uno por ciento) de las reservas mínimas estimadas de agua mencionadas (6.000 hm³ o MMm³, seis mil) permitiría fracturar en el orden de unos 300.000 (trescientos mil) pozos, cantidad que supera en varios órdenes de magnitud las previsiones para el desarrollo de los RNC de toda la cuenca. Ante tremenda magnitud de reservas, la explotación potencial del SANeRa sería totalmente sostenible.

Estas reservas estimadas son más abundantes en el sector E del área de estudio, disminuyendo hacia el W y siendo prácticamente nulas en el sector más alto del Dorso de los Chihuidos cuando el nivel piezométrico (NP) queda por debajo del Rayoso clástico. Pero en esta última área, con el NP (techo de la Zona Saturada) muy profundo, sí habría en la muy espesa Zona No Saturada (por encima del NP) acuíferos “colgados”, con reservas consideradas prácticamente muy bajas frente a las anteriores, aunque localmente pueden ser importantes, como en el poblado Los Chihuidos ubicado allí, que consume agua de acuíferos colgados del SANeRa.

El volumen muy grande de reservas de agua subterránea estimadas resalta la muy relevante importancia del SANeRa en esta región árida/ semiárida como fuente de agua, no sólo para la industria hidrocarburífera en todas sus actividades además de la fracturación hidráulica de RNC, sino también para todas las actividades humanas según sea salobre o no en cada área (industria, ganadería, eventualmente agricultura y bebida). Para que la explotación sea sustentable, debe realizarse dentro del marco de la Gestión Integrada de Recursos Hídricos y el Desarrollo Sostenible.

Modelo hidrogeológico conceptual del SANeRa. Resumen. Hipótesis de trabajo. Algunas conclusiones preliminares

El modelo hidrogeológico conceptual del Sistema Acuífero Grupo Neuquén y Formación Rayoso propuesto para este sector de la cuenca, a escala sub-regional, se esquematiza en la Fig. 6. Presenta las siguientes características principales (extrapolables a áreas vecinas):

- En los 13.000 km² estudiados está parcialmente asociado con el ciclo hidrológico superficial a través de dos áreas de recarga in situ principales: la Sierra de Auca Mahuida y el Dorso de los Chihuidos, y un área de descarga principal con surgencia: el Bajo de Añelo.
- También posee recarga por aporte de agua alóctona (del deshielo de los Andes) de los ríos Neuquén y Colorado (el primero dentro del área de estudio, el segundo al N de la misma).
- Nivel Piezométrico (NP) sub-horizontal, con muy suave gradiente general hacia el E y S. Se encuentra aproximadamente entre 300 y 350 msnm. Los importantes desniveles topográficos

hacen que el NP esté a profundidades entre someras y cientos de metros, o que sea surgente en depresiones como el Bajo de Añelo hasta más de 100 msst, con ejemplos de 9 bar en boca de pozo, presión estable luego de 15 ó 20 años de uso. La surgencia genera pequeños oasis locales que podrían potenciarse y multiplicarse con adecuados estudios, gestión y promoción.

- Sistema Acuífero “multicapa” o “multiunitario”, con funcionamiento libre en las capas superiores y semiconfinado/ confinado a mayor profundidad.

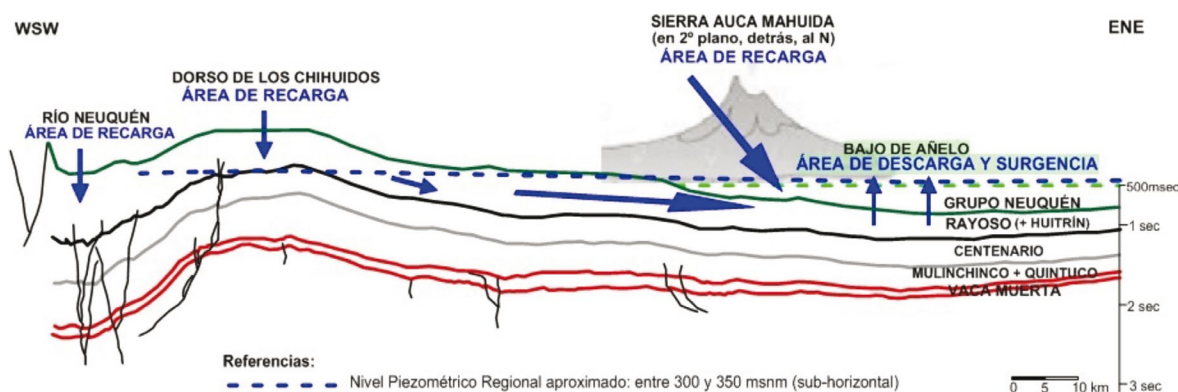


Figura 6. Modelo Hidrogeológico Conceptual. (Esquema inspirado en sección sísmica sub-regional.)

- Capas acuíferas profundas con salinidad relativamente baja hasta cientos de metros, sumando un espesor acuífero acumulado total de 50 a 400 m y porosidad mayor a 20%.
- Transmisividad de 50 a 350 (y hasta 700) m^2/d ($\text{m}^3/\text{d.m}$): pozos de características industriales (de empresas petroleras) de alta productividad, caudales en el orden de 1000 a 3000 m^3/d , con caudales específicos de 1 a más de 6 $\text{m}^3/\text{h.m}$.
- La salinidad suele ser relativamente baja aunque en general es salobre pues supera los 1500 mg/l, entonces suele ser NO APTA para “abastecimiento de poblaciones” y/o “irrigación”, usos con que la Prov. Neuquén restringe su utilización en reservorios no convencionales (dec.1483/12), ergo debe evaluarse en cada caso, no siendo válido generalizar la restricción para este uso.
- Reservas en el orden de 600.000 hm^3 (MMm^3), 1ª estimación expeditiva en 13.000 km^2 estudiados.
- Acuíferos colgados en zona no saturada, regionalmente poco relevantes pero explotables y por lo tanto a veces con importancia local, pueden alimentar manantiales que usan pobladores rurales.
- Sistema acuífero de alta productividad, su explotación es sustentable si el Estado encabeza/ impulsa la Gestión Integrada de Recursos Hídricos (GIRH). Las empresas podrían, dentro de la responsabilidad social empresarial, ser motores importantes del Desarrollo Sostenible

pues tienen capacidad para perforar pozos para uso propio y todo otro uso de la sociedad en general. La potencialidad y la gran oportunidad de generar “oasis” productivos son enormes.

- Hipótesis de trabajo propuesta (a validar o refutar con estudios isotópicos): El Sistema Acuífero Grupo Neuquén y Formación Rayoso es el principal recurso hídrico subterráneo de la Cuenca Neuquina. Este importante y espeso conjunto de capas permeables, interconectadas hidráulicamente a escala regional pero separadas localmente por acuitardos (“semi-sellos”) y acuicludos (“sellos”), posee complejidades comparables con sistemas acuíferos más estudiados en otras regiones áridas/semiáridas del planeta (ejemplos: Nubian Sandstone Aquifer System, NE de África, Khater 2003; High Plains Aquifer System, centro de EE.UU, Kansas Geological Service), explotados intensa y sosteniblemente. Una de las complejidades es la existencia de aguas subterráneas de distinto origen, edad y mineralización/salinidad, entre ellas “agua fósil”. Esto originaría anomalías en las características de los acuíferos y del agua contenida. La anomalía de disminución de la salinidad con el aumento de la profundidad (interpretada en pozos petroleros de 2 sitios en la zona estudiada) podría deberse a que en paleoclimas húmedos (¿períodos interglaciarios?), el SANeRa se habría “llenado” rápidamente con aguas de baja mineralización que ahora se encontrarían en capas semiconfinadas/confinadas profundas y mantendrían su baja salinidad relativa pues estarían desconectadas del actual ciclo hídrico; pero las capas superiores sí estarían conectadas con el presente ciclo árido/semiárido que facilitaría su mayor mineralización durante la recarga actual. Esta hipótesis también considera análisis isotópicos de agua profunda del SANeRa de una zona cercana (Bitesnik *et al.* 2002) que permitió postular como posible origen la infiltración en clima más húmedo y frío que el actual: hace 30.000 años(?), ó 13.000-9000 años antes del presente; lo cual implicaría posible agua fósil a ciertas profundidades no someras.
- Si la hipótesis anterior se verificase, gran parte de los recursos hídricos de baja salinidad del SANeRa serían aguas fósiles. Al respecto, vale destacar lo señalado por Llamas y Custodio (2003; traducción propia del original inglés): “en áreas donde la recarga es baja o no existe... la discusión del uso sustentable... no debe llevarse a cabo usando los puntos de vista usuales de países (regiones) húmedos e industrializados... Con adecuada gestión, muchos países (regiones) áridos podrían usar sus recursos no renovables más allá del futuro predecible... puede ser una opción razonable mientras que los datos disponibles aseguren que se la puede mantener económicamente por algún tiempo... y que los costos ecológicos son compensados por los beneficios socio-económicos... el agua subterránea fósil no tiene valor intrínseco si se la deja en el subsuelo, excepto como potencial recurso para futuras generaciones, pero surge la pregunta de cómo determinar si ellos la necesitarán más que la generación presente”. En línea con esto, es opinión del autor del presente trabajo que en esta región árida/ semiárida es imprescindible que las actuales generaciones exploten la importante reserva de agua del SANeRa mediante la GIRH dentro del Desarrollo Sostenible, pues contribuirá al desarrollo

de RNC para el autoabastecimiento energético, y traerá grandes beneficios socioeconómicos para todas las actividades humanas.

EJEMPLO 2: BORDE NORTE DE LA CUENCA NEUQUINA

Como segundo ejemplo, se presentan estudios en elaboración en un sector del Sur de la Provincia de Mendoza, borde Norte de la Cuenca Neuquina, realizados en base a información pública antecedente y a trabajos propios (Meconi *et al.* 2016; y otro en prensa).

El contexto geológico se resume de Späth *et al.* (2017) de donde se toma la Fig. 7: “ámbito de plataforma de la cuenca”, “adelgazamiento, pinch out y truncación de las formaciones hacia el sector de borde”, “espesa cobertura basáltica (Mioceno a Plioceno-Holoceno) de 50 a 100 m”, “Grupos Malargüe y Neuquén con espesores que rondan los 300 m y apoyan sobre rellenos del Precuyo o basamento (Grupo Choiyoi)”, con petróleo pesado en el Grupo Neuquén a profundidad somera. El corte A-B de Fig. 7 va del SW del Río Colorado al NE del mismo, llegando a la zona en estudio del presente ejemplo, que se ubica en la Fig. 8.

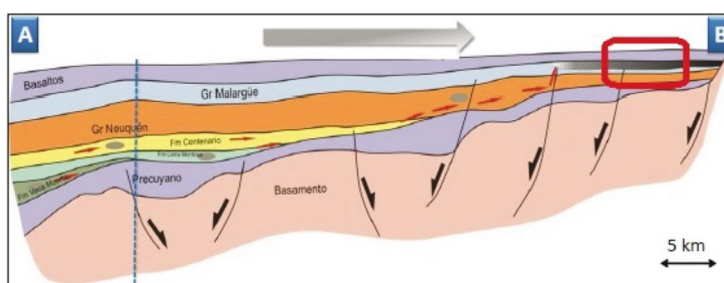


Figura 7. Contexto geológico borde norte Cca. Neuquina, tomado de Späth *et al.* (2017). SW-NE. Recuadro rojo: zona en estudio ejemplo 2. Flechas rojas de Späth *et al.* (2017): posible migración de hidrocarburos.

Existen dos mapas hidrogeológicos antecedentes de la Provincia de Mendoza en escala 1:500.000 (CRAS 1996; Zambrano y Torres 1996). El área en estudio ocupa la unidad hidrogeológica de basaltos terciarios y cuaternarios “VT” de los segundos autores; y “I” de los primeros, que la subdividen en “Unidad Geológica 8: UG8: Basaltos miocenos a pleistocenos”, y “UG9: Basaltos holocenos”. Pazos *et al.* (1993) denominan “Provincia Hidrogeológica Mesetas y Cerros Basálticos” a esta región, que es árida/semiárida con déficit hídrico de 500 a 600 mm/año, donde tradicionalmente la dispersa población rural practica escasa cría de animales.

En los últimos años se están realizando trabajos hidrogeológicos de más detalle que, entre otros resultados, permiten elaborar el mapa hidrogeológico de superficie de una región de unos 6200 km² en el Sur de Mendoza (primera versión que está siendo mejorada; Meconi *et al.* 2016), que abarca desde La Payunia en el Norte, hasta el Río Colorado en el Sur, incluyendo a la Sierra de Chachahuén (Fig. 8). Se están realizando trabajos similares para extender la zona de estudio

hacia el Oeste de la Provincia de La Pampa (Meconi *et al.* en prensa), que presenta continuidad geológica/ geomorfológica/ hidrogeológica con el Sur de Mendoza. En el oeste de La Pampa existen trabajos hidrogeológicos de mayor detalle (Bisceglia 1977; Malán *et al.* 2005; Loyola *et al.* 2016).

Para la elaboración de este mapa hidrogeológico se utilizan como base hojas geológicas del SEGEMAR 1:200.000 (Holmberg 1962; González Díaz 1979) e imágenes satelitales, de igual forma que para los trabajos actuales que extienden dicho mapa hacia el Oeste de La Pampa (Núñez 1976).

Se realizan relevamientos y mediciones de campo, se muestrea agua superficial (lagunas), agua subterránea (pozos de escasa profundidad excavados a mano y/o con dinamita, más raramente perforados), manantiales y aguadas que se encuentran en los bajos topográficos de los basaltos que constituyen la mayor parte de las mesetas de la región, y en vulcanitas de las sierras.

Unidades hidrogeológicas del mapa hidrogeológico subregional elaborado

Al presente se definen 8 unidades hidrogeológicas usando la idea de “síntesis” (ver detalles en “Mapa Hidrogeológico de superficie, con unidades hidrogeológicas ‘sintéticas’”) agrupando unidades geológicas (de las hojas geológicas) con comportamientos hidrogeológicos similares.

Las unidades hidrogeológicas más importantes y de mayor extensión geográfica corresponden a los basaltos y otras vulcanitas (unidades N° 4, 6 y 7 del mapa hidrogeológico, Fig. 8) que constituyen acuíferos fisurados, es decir con porosidad y permeabilidad principalmente de origen secundario por fracturación. El agua subterránea somera almacenada en estas unidades y que se obtiene de pozos, manantiales y aguadas, es el principal recurso hídrico aprovechado por la escasa población rural, y potencialmente aprovechable para otras actividades (como la hidrocarburífera) cuando se optimizan las captaciones aumentando su caudal, por ejemplo las aguadas, lo cual también es beneficioso para el mejor uso de los pobladores y animales dispersos.

En las abundantes lagunas suelen mezclarse aguas de distintos orígenes: dulce de lluvia, que por concentración de sales debido a la evaporación puede pasar a ser salobre o salada; con agua subterránea de salinidad relativamente baja a media que se recarga y circula por las sierras y extensas mesetas de vulcanitas fracturadas y alteradas (principalmente basaltos), hasta descargar mediante manantiales y aguadas en los bajos topográficos donde se encuentran dichas lagunas.

Sistema acuífero: unidad hidrogeológica de superficie principal “N° 4: Basaltos: acuíferos fisurados”

Los basaltos constituyen la principal unidad hidrogeológica de superficie. Son extensas mesetas de numerosas coladas superpuestas con espesor total entre algunos metros a varias decenas.

Agrupar a los “Basaltos I, II, III, IV, V, VI y VII” (y similares) de las hojas geológicas del SEGEMAR 1:200.000, del Mioceno al Holoceno (Holmberg 1962; González Díaz 1979). Esto se justifica pues hidrogeológica y simplificada se comportan de forma similar como una sola unidad hidráulica interconectada, como “sistema acuífero fisurado”. Originalmente estas vulcanitas, si son macizas, suelen comportarse como “acuífugos” (no porosos, impermeables; salvo si son vesiculares), pero la meteorización produjo fracturas/fisuras y alteración, originando porosidad y permeabilidad secundarias, cambiando drásticamente su comportamiento hidrogeológico.

Esta unidad se comporta en general como un sistema acuífero libre o freático: cuando se excava o perfora, una vez que se ingresa en la Zona Saturada, el nivel piezométrico es un nivel de agua libre, no asciende por el pozo ya que no está sometido a carga hidráulica sino sólo a presión atmosférica a través de la porosidad y permeabilidad secundarias. No se descarta que a mayores profundidades, cuando el espesor de los basaltos alcanza varias decenas de metros, puedan existir niveles acuíferos relativamente discretos con algo de carga hidráulica sobre sus techos, y por lo tanto posean un nivel piezométrico que sí ascienda por el pozo a modo de capa acuífera semiconfinada o confinada.

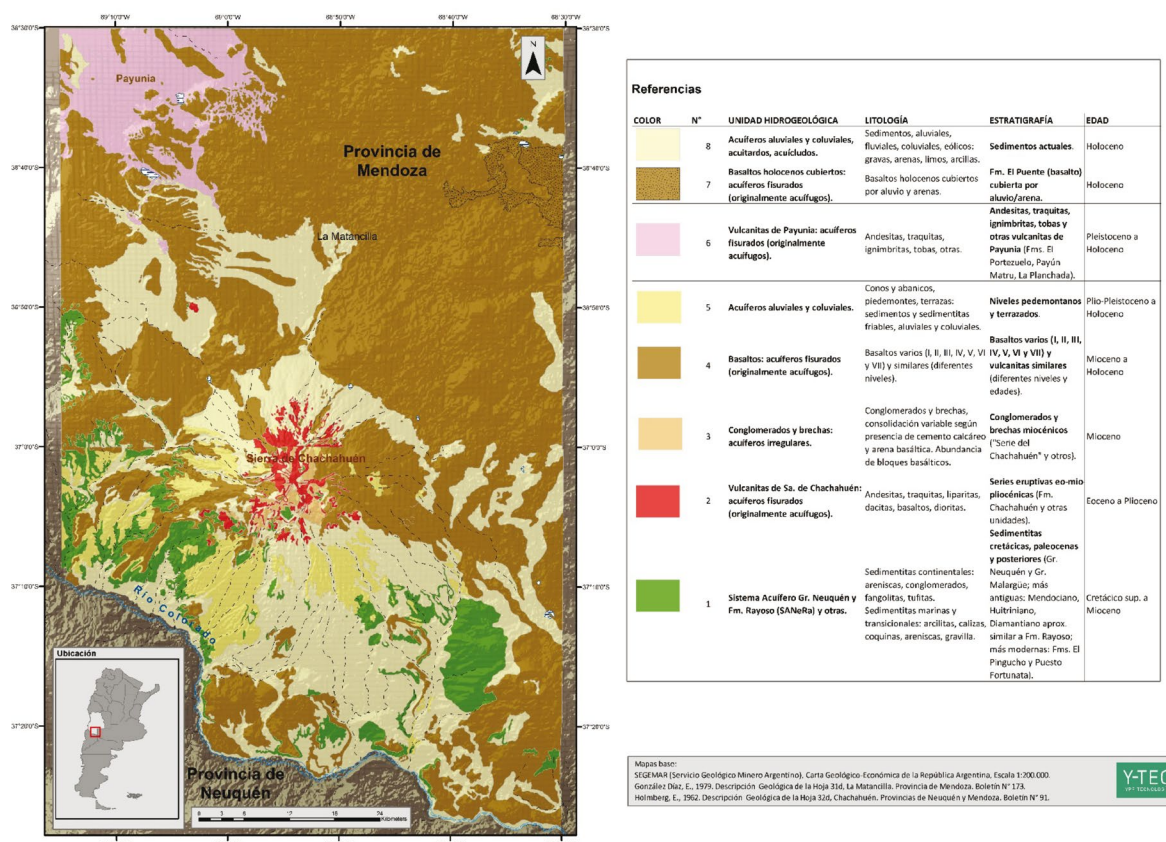


Figura 8. Mapa hidrogeológico de superficie de un sector de S de Prov. Mendoza, entre Payunia y Río Colorado;1ª versión. Tomado de Meconi *et al.* 2016

La meteorización, maximizada por el almacenamiento y la circulación del agua por las fracturas y fisuras, ha producido grandes áreas de alteración a carbonatos, conformando extensos campos de “tosca”, principalmente en los bordes de las mesetas basálticas o “bardas”. Esto se genera usualmente cuando en las bardas se produce descarga de agua subterránea (manantiales o vertientes generalmente de escaso caudal pero relativamente persistentes a lo largo del año) hacia los abundantes bajos topográficos de muy diversas dimensiones. Los manantiales se producen cuando la superficie topográfica tiene forma de resalto o desnivel abrupto (como las “bardas”), y “corta” a la superficie freática, que es relativamente somera (menos de 1 m a algunos metros de profundidad).

En general los bajos topográficos son poco pronunciados (de algunos a varios metros de desnivel entre el tope de las mesetas y el fondo de los mismos). Y en numerosas ocasiones el fondo de los bajos también es de basaltos, generalmente cubiertos por un delgado espesor de sedimentos recientes. Y por dichos fondos también suele producirse descarga de agua subterránea: se bombearon aguadas tanto naturales como excavadas en el fondo de estos bajos y las mismas recuperaron el nivel de agua rápidamente, o no lo variaron, debido a la surgencia de agua freática a través del fondo. Es por eso que no sólo las bardas de los bajos topográficos actúan como zona de descarga de agua subterránea, sino que los bajos en general son áreas de descarga ya que una parte de su superficie topográfica puede estar por debajo de la superficie freática. Entonces las lagunas y aguadas naturales o excavadas dentro de los mismos perduran la mayor parte del año aunque no llueva, pues son alimentadas prácticamente en forma permanente por agua subterránea que descarga en ellos, y por lo tanto son cuerpos de agua “ganadores” o “efluentes”. E incluso se los puede considerar como “humedales dependientes del agua subterránea” (Manzano, 2005).

Estos basaltos alterados a tosca se estudiaron en cortes delgados al microscopio y muestran costras de carbonato conformando ooides y pisolitas con núcleos de cuarzo, plagioclasas, fragmentos de basaltos olivínicos, cementados por calcita microcristalina. Esto evidencia depositación en cuerpo de agua poco profundo o acuífero freático, con presencia de cianobacterias. La calcita es el producto de alteración del basalto, reemplaza al vidrio volcánico y a cristales de plagioclasa. Todo esto evidencia presencia y circulación de agua rica en carbonatos. (Rodríguez 2016, comunicación personal.)

No se descarta que además en esta unidad hidrogeológica puedan existir túneles lávicos/cavernas, pues si bien no se conocen concretamente en el Sur de Mendoza, sí existen en el Oeste de la La Pampa, cerca de Puelén: la más conocida es la Cueva de Halada (Bertotto 1996), en un ambiente geológico e hidrogeológico similar pues es continuación de las grandes mesetas basálticas de esta región. Incluso los “Pozos de Carapacho”, el Oeste de la Laguna de Llacanelo (en un ambiente volcánico similar, más al Norte), podrían ser una caverna o túnel de lava derrumbado, por los cuales surge muy abundante agua de baja salinidad. Se han recogido crónicas de perforadores de pozos de agua subterránea de la región que indican que es relativamente

común que cuando perforan, en ocasiones la mecha y las barras quedan “colgadas en el aire” a determinadas profundidades, y avanzan repentinamente muy rápido, sin perforar material alguno, como si estuvieran atravesando cavernas o túneles. Estas crónicas y ambos sitios citados en este párrafo (conocidos en la literatura geológica y relevados y muestreados en este trabajo), indicarían que sería posible que los túneles y cavernas lávicas existiesen en distintas profundidades debido a la superposición de las numerosas coladas, y por lo tanto agregarían a esta unidad hidrogeológica un rasgo atípico: la potencial presencia de “ríos subterráneos” o similares (tal como suele suceder en otros ambientes hidrogeológicos distintos, como los kársticos, en los que la disolución de las rocas a partir de la circulación de agua subterránea por fracturas y fisuras es el proceso principal que los genera). A diferencia del karst, en el ambiente de rocas volcánicas las cavernas o ríos subterráneos tienen su origen en túneles lávicos que se forman porque las coladas de lava, a medida que van fluyendo, se van enfriando externamente en contacto con la atmósfera, pero siguen fluyendo en su interior más caliente, resultando en la conformación de una costra sólida externa y en un flujo caliente interno que al continuar circulando y en un momento cesar el aporte de lava, se “vacía” y queda un túnel formado por la costra.

De 21 muestras de agua subterránea y de manantiales/aguadas tomadas de esta unidad y analizadas en laboratorio (se continúa con más muestras), 14 no cumplen con la norma de potabilidad del Código Alimentario Argentino (CAA), en general por ser salobres y/o exceder la concentración de algunos aniones mayoritarios que le producen dicha salobridad (además de algún otro parámetro minoritario/traza); sólo 1 cumple con dicha norma; y 6 la exceden por escaso margen. A pesar de este problema de calidad, como se explicó en “Salinidad del agua del SANeRa”, el agua salobre es utilizada en esta zona árida/semiárida debido a la escasez general de recursos hídricos, y los bajos topográficos con manantiales/aguadas pueden ser pequeños oasis en la región.

Sistema acuífero: unidad hidrogeológica de subsuelo principal “sedimentitas varias”

La unidad hidrogeológica de subsuelo más importante, escasamente aflorante en el área estudiada, es el conocido en el centro de la Cuenca Neuquina como “Sistema Acuífero Grupo Neuquén y Formación Rayoso (SANeRa)”, aquí en el borde de la cuenca se agrega “y otras”, porque incluiría al Grupo Malargüe. Es la unidad N° 1 del mapa hidrogeológico de la Fig. 8. Como se vio en el Ejemplo 1, en el centro de la cuenca (Provincia de Neuquén) es el principal recurso hídrico subterráneo, estudiado con más detalle allí. Aquí, en el borde de cuenca, la Formación Rayoso no estaría desarrollada (sí algunas unidades posiblemente equivalentes: “Mendociano”/“Huitriniano”/“Diamantino”; Holmberg 1962; González Díaz 1979). A diferencia del sistema basáltico antes descrito, éste es un sistema acuífero con porosidad y permeabilidad primarias, intergranulares. Las facies del Grupo Malargüe (que cubre al Grupo Neuquén) tendrían un comportamiento

hidrogeológico menos relevante que las del Grupo Neuquén, por lo cual las características acuíferas más conspicuas se desarrollarían en este último. En el área en estudio la caracterización hidrogeológica de esta unidad es incipiente y debe profundizarse pues su aprovechamiento depende de la compleja arquitectura y estructura de estas sedimentitas continentales cretácicas, y de otras transicionales y marinas más antiguas y más modernas.

Modelo Hidrogeológico Conceptual preliminar: hipótesis de trabajo, algunas conclusiones

Antes de presentar el esquema del modelo hidrogeológico conceptual preliminar de este 2º ejemplo, debe señalarse un dato llamativo que sirve para postularlo: un pozo de agua de varias decenas de metros de profundidad enteramente en los basaltos, muy alejado de áreas petroleras, fue muestreado en dos fechas distintas y en ambas presentó rastros de hidrocarburos degradados de origen natural. Se plantea sólo como hipótesis de trabajo a dilucidar con más estudios (Meconi *et al.* en prensa) que estos hidrocarburos podrían provenir de eventuales reservorios ubicados en las sedimentitas subyacentes del Cretácico Superior (tal vez el Grupo Neuquén, característico reservorio del borde de la Cuenca Neuquina), que ascenderían hasta profundidades someras y/o hasta la superficie; son conocidos los manaderos de petróleo del borde de la cuenca.

Esta hipótesis de trabajo tiene en cuenta también que una empresa petrolera con una universidad (Späth *et al.* 2017; Arioni 2016) realizaron Sondeos Eléctricos Verticales (SEV) en esta región del Sur de Mendoza, para estudiar la profundidad del basamento, los espesores del basalto, y los de la cuña sedimentaria existente entre ambos; con esos fines, Späth *et al.* (2017) elaboraron e interpretaron el corte geoelectrico que se presenta en la Fig. 9. Al re-interpretar en el presente trabajo estos SEV desde el punto de vista hidrogeológico (Meconi *et al.* en prensa), las resistividades de los rangos 50-850 y aproximadamente 25 ohm.m de la Fig. 9 pueden también interpretarse como acuíferos con agua de baja salinidad relativa/ salobre en las sedimentitas debajo de los basaltos, o sea en la unidad hidrogeológica N° 1 del mapa de la Fig. 8; no sería incompatible la existencia de hidrocarburos y de este tipo de agua en las mismas capas y/o en capas distintas de un mismo complejo de capas del Grupo Neuquén, tal vez también del Grupo Malargüe.

A partir de las descripciones de las unidades hidrogeológicas/sistemas acuíferos antes presentados, y a la hipótesis de trabajo antes señalada, se plantea un modelo hidrogeológico conceptual preliminar, esquematizado en la Fig. 10. Como se ve, el mismo se complejiza debido a que las sedimentitas cretácicas que subyacen a los basaltos (sistema acuífero fisurado) podrían actuar como reservorios de hidrocarburos y como sistema acuífero al mismo tiempo en general, o de una forma u otra en diferentes zonas. Tal como se señaló en la definición de sistema acuífero, las dos unidades hidrogeológicas o sistemas acuíferos antes descriptos (basaltos por un lado, sedimentitas por otro), al tener relación, podrían constituir otro sistema acuífero de mayor escala. Más estudios en ejecución y otros futuros podrán definir mejor o refutar esta hipótesis de trabajo.

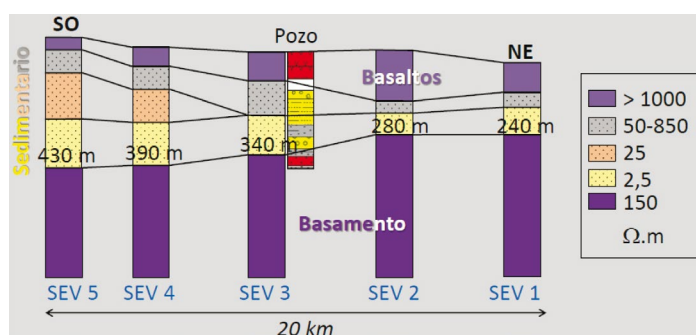


Figura 9. Interpretación geoelectrica tomada de Späth *et al.* (2017). Zona entre La Matancilla y Sierra de Chachahuén, centro mapa Fig. 8. Fig. 10 inspirada en parte en tercio superior central de esta interpretación.

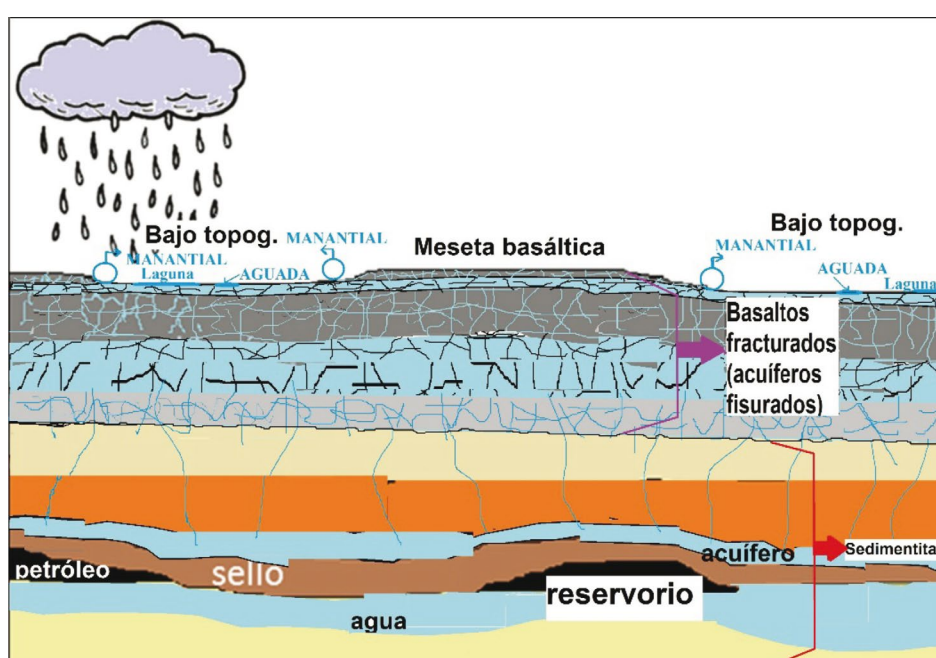


Figura 10. Modelo Hidrogeológico Conceptual preliminar: hipótesis de trabajo (Meconi *et al.*, en prensa)

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En apartados anteriores, para cada uno de los dos ejemplos, ya se han presentado conclusiones/resúmenes, en general preliminares pues los trabajos continúan y se espera realizar estudios más detallados en el futuro. Por cuestiones de espacio, se remite a las mismas, y acá sólo se resaltan/amplían algunas generalidades, varias ya expuestas de una u otra forma.

Es pertinente explicitar y resaltar que el agua es un recurso estratégico para explorar y producir hidrocarburos, no sólo para la fracturación de los reservorios no convencionales, sino también de los convencionales; y además para la recuperación secundaria y terciaria (EOR) en yacimientos maduros; y para las múltiples operaciones que demandan agua para explorar y producir hidrocarburos en el Upstream.

Los estudios hidrogeológicos para caracterizar y definir sistemas acuíferos y elaborar modelos hidrogeológicos conceptuales que los representen, son herramientas fundamentales y muy útiles para la toma de decisiones, reduciendo las incertidumbres desde dos muy importantes y complementarios puntos de vista: el del “recurso hídrico para uso sostenible”, y el “ambiental” para proteger acuíferos de baja salinidad con cañerías guía e intermedia, cumpliendo con las normas estatales. El paradigma de la Gestión Integrada de Recursos Hídricos (GIRH) dentro del Desarrollo Sostenible es el marco conceptual óptimo para lograr esta complementariedad.

Es recomendable que la industria hidrocarburífera incluya en sus trabajos de rutina el estudio de los sistemas acuíferos por sus propios geocientistas. Es óptimo que éstos estudien los recursos hídricos subterráneos utilizando las mismas herramientas que se usan para estudiar los reservorios, que ellos manejan mejor que nadie, incorporando además conocimientos hidrogeológicos y especialistas en esta rama de las geociencias, trabajando en equipos interdisciplinarios hidrogeólogos con geólogos petroleros operativos/ de desarrollo, reservoristas, especialistas en modelado, en SIG. Son muy pocas las petroleras que cuentan con la especialidad de hidrogeólogo.

En el caso de contratar servicios de consultoría externa para trabajos hidrogeológicos, integrar en dichos trabajos los equipos externos con los internos. Una dificultad seria suele ser la interpretación petrofísica de perfiles de pozos para la determinación indirecta de la salinidad del agua de los acuíferos. No hay mejores petrofísicos para esta interpretación que los que trabajan en la industria petrolera, interactuando con hidrogeólogos que aporten la visión desde esta expertise, ya que el agua de los acuíferos suele tener más variedad de sales y no sólo cloruro de sodio, el cual no siempre es mayoritario. Se señala este punto en particular pues la interpretación petrofísica en zonas de interés hidrocarburífero estandariza la salinidad a NaCl, pero esto puede no ser adecuado y/o acarrear confusiones en los acuíferos donde éste no es siempre el electrolito mayoritario.

Circunscribir proactivamente en el Upstream el estudio del agua como un recurso estratégico para ser utilizado sosteniblemente para explorar y producir hidrocarburos, agrega valor pues es una inversión. La visión proactiva minimiza a la reactiva, ésta estudia el agua sólo para remediar los impactos ambientales reales y mitigar los potenciales, lo cual es un gasto o costo. Invertir proactivamente en el estudio de un recurso estratégico disminuye el costo reactivo.

El agua es un recurso estratégico para explorar y producir hidrocarburos.

AGRADECIMIENTOS

El autor agradece a YPF Tecnología S.A.(Y-TEC) la autorización para publicar este trabajo. A mis compañeros F. Larriestra, O. Palma, E. Rodríguez y R. Ponti por sus valiosos aportes. Por el valioso intercambio profesional a F. Späth, F. Vittore, M. Viqueira, F. Chiachirelli, D. M. Foster, G. Sánchez, F. Galván, P. De Battista. A Carlos Selva (Y-TEC) por la lectura crítica y valiosas sugerencias; y a él y J.Sebastián Galeazzi (Total)por el apoyo y por comprender con entusiasmo

la gran importancia del agua como recurso estratégico para explorar/producir hidrocarburos y energía.

NOTA 1

Sobre los mapas “de Profundidad del Nivel Piezométrico (NP) o de la Superficie Piezométrica (SP)” (medido desde la superficie topográfica), y “Equipotencial del NP o Isopiécico” (medido desde el nivel del mar), es necesario aquí hacer estas aclaraciones para evitar confusiones que suelen ocurrir, sobre todo cuando se interactúa interdisciplinariamente (hidrogeólogos con geólogos petroleros o de otras especialidades, y/o con ingenieros), en general debido a las distintas jergas disciplinarias y/o utilizadas por distintos software. En ocasiones a estos mapas se los confunde, pero son muy distintos:

- Un “Mapa Equipotencial o Isopiécico” sirve para determinar el flujo subterráneo. Las isopiezas son líneas de igual altura de agua sobre un plano horizontal de referencia arbitrario (PHRA), que suele ser el nivel del mar (nm) (pero puede ser otro). Las isopiezas son líneas equipotenciales generadas por la intersección de las superficies equipotenciales con la superficie piezométrica. Las líneas de flujo son perpendiculares a las superficies equipotenciales y por lo tanto también a las isopiezas. Si las isopiezas son positivas, están por encima del PHRA y “crecen” hacia los “máximos”, si son negativas están por debajo del PHRA y “bajan” hacia los “mínimos” haciéndose cada vez más negativas.
- El flujo subterráneo y por lo tanto las líneas de flujo van desde las isopiezas de mayor valor a las isopiezas de menor valor: el flujo subterráneo se produce de mayor potencial hidráulico a menor potencial hidráulico. El potencial hidráulico es el que gobierna el flujo subterráneo y no la “presión” (suele decirse “presión” queriendo significar potencial hidráulico, pero estrictamente debe decirse potencial hidráulico, o carga hidráulica, o nivel piezométrico).
- Softwares y profesionales petroleros suelen utilizar “TVDSS: true vertical depth sub-sea” para mapas estructurales o similares de determinadas superficies geológicas (techos y bases de formaciones/capas, horizontes sísmicos, etc.), usando valores positivos cada vez más grandes cuando “bajan” hacia los “mínimos”, en lugar de negativos, porque como suelen estar debajo del nivel del mar, usar números positivos simplifica el trabajo. Pero en mapas hidrogeológicos como el “Equipotencial = Isopiécico”, y el de “Profundidad del NP”, se recomienda no utilizar TVDSS porque acarrea confusión, sino utilizar “metros sobre el nivel del mar” (“msnm”) para el primero y “metros respecto a la superficie topográfica (“mst”) para el segundo.
- El “Mapa de Profundidad del Nivel Piezométrico (NP)” representa la distancia vertical desde la superficie topográfica (“st”) (que casi siempre es irregular y casi nunca es ni horizontal ni plana) hasta el NP. Si se aclara que es “mbst = metros bajo superficie topográfica”, se mide de “arriba hacia abajo”: más positivos = más profundo. Si se aclara que es “msst = metros sobre

superficie topográfica”, se mide de “abajo hacia arriba”: más positivos = más arriba de la st. Si no se aclara si es “bajo” o “sobre” (como en el mapa de la Fig. 5) y/o se pone sólo “mst”, se asume que valores “negativos” son “bajo” la st, o sea en profundidad bajo la st, y valores “positivos” son “sobre” la st, o sea en altura sobre la st. Cuando se usa “bp” = “boca de pozo” en lugar de “st” (pues la bp no tiene por qué coincidir con la st: el caño que actúa como “bp” puede no estar cortado al ras de la st) entonces “mbbp”, “msbp” y “mbp”, se interpretan de la misma forma.

- En el “Mapa de Profundidad del Nivel Piezométrico (NP)” se representa en general la medida de arriba hacia abajo, aunque en ocasiones se elige representarla de abajo hacia arriba. A pesar de que medir la profundidad de la 2ª forma es la que se utiliza menos, suele ser útil cuando hay agua surgente, como en la Fig. 5: se eligió esta forma para que resalten con números positivos las zonas celestes donde el agua es surgente sobre el terreno y si se pusiera un caño lo suficientemente largo para que la columna de agua no se “desarmara”, podría llegar hasta la altura sobre la superficie topográfica señalada por las curvas (altura que se puede traducir en presión de surgencia). Este mapa sirve también para que se pueda estimar a partir de qué profundidad de perforación se entrará en la Zona Saturada, en el mapa de la Fig. 5 son los colores verdes, marrones, rojos.
- Se recomienda usar el término hidrogeológico específico “piezométrico” y derivados, en lugar de “potenciométrico” y derivados.

REFERENCIAS CITADAS

- Alonso, R. M., 2016. Caracterización geológica de la Formación Rayoso y del Subgrupo Río Limay (Grupo Neuquén) y su relación con las aptitudes hidrogeológicas en el sector centro-norte de la P. del Neuquén. Trabajo Final de Lic. Cs Geológicas, Dto. Geología y Petróleo, F. Ing., UN Comahue.
- Alonso, R., A. Giusiano y A. Dufilho, 2016. Caracterización hidrogeológica de F. Rayoso y G. Neuquén en sector centro N de P. Neuquén. IX Cong. Arg. Hidrogeología. Tomo Rel. Agua Subt.-Sup. 46-53.
- Arioni, L., 2016. Exploración sub basáltica del basamento resistivo en el borde nororiental de la Cuenca Neuquina mediante Sondeos Eléctricos Verticales. Tesis Lic. Geofísica, FCAG, UN La Plata.
- Bedini, P. y G. Meconi, 2015. Método para el estudio de acuíferos con información de pozos hidrocarburíferos para proveer agua a la industria petrolera; ejemplo: Yac. Punta Barda, Cuenca Neuquina. Jornadas de Gerenciamiento Integral de Agua en Yac. Petroleros, IAPG, C. Rivadavia.
- Bertoni, L. y A.C. Dufilho, 2016. Caracterización hidrogeoquímica de acuíferos de la región noreste de Prov. Neuquén. IX Cong. Arg. Hidrogeología. Tomo Calidad del Agua subterránea, 264-271.
- Bertotto, G., 1996. “Morfología del túnel lávico cenozoico ‘Cueva de Halada’. Departamento Puelén, Prov. La Pampa”. VI Jorn. Pampeanas de Cs.

- Naturales. COPROCNA. Comunic 13-15. Santa Rosa.
- Bisceglia, H., 1977. Estudio Hidrogeológico de la región de la Meseta Basáltica Pampeana, con especial referencia a los manantiales. Administración Prov. Agua, Prov. La Pampa. 104 pp. Inédito.
- Bitesnik, H., G. Meconi y P. Tchilinguirian (para NSC, para Chevron San Jorge), 2002. Estudio de los recursos hídricos subterráneos del Grupo Neuquén, Yacimiento El Trapial, Neuquén. Inédito.
- CAA (Código Alimentario Argentino), Capítulo XII, artículo 982 (norma nacional para agua potable).
- Catalán Lafuente, J., 1981. Química del agua. Edición del autor, Madrid.
- Colombino, J. y M. Luengo, 2011. Reg. Hidrogeológicas. 18 Cong. Geo. Ar. Neuquén, Relat. 833-840.
- CRAS (Centro Regional de Agua Subterránea), 1996. Mapa Hidrogeológico de la Provincia de Mendoza, escala 1:500.000. Coords.: Wetten, C. y J. Pazos.
- Gatica, J. y A. Dufilho, 2016. Estimación de la recarga potencial de acuíferos en la cuenca endorreica Bajo de Añelo, P. Neuquén. IX Cong. Arg. Hidrog. Tomo Relac Agua Subt. Superficial 175-182.
- González Díaz, E., 1979. "Descripción Geológica de la Hoja 31d, La Matancilla. Provincia de Mendoza". Boletín N° 173, SEGEMAR, Carta Geológico-Económica de la R. Argentina, 1:200.000.
- GWP (Global Water Partnership), 2000. Manejo (Gestión) Integrado de Recursos Hídricos (GIRH; Integrated Water Resource Management: IWRM). TAC Background Papers N° 4. 77 pp.
- Hernández, M., 2015. Recursos Hídricos. En: Recursos hidrocarburíferos no convencionales shale y el desarrollo energético de Argentina. Caracterización, oportunidades, desafíos. EUDEBA, 307-348.
- Hernández, M., N. González y L. Hernández, 2017. Hydrogeology of a Large Oil-and-Gas Basin in Central Patagonia. San Jorge Gulf Basin, Argentina. SpringerBriefs in Latin American Studies. 9
- Holmberg, E., 1962. "Descripción Geológica de la Hoja 32d, Chachahuén. Provincias de Neuquén y Mendoza. Boletín N° 91", SEGEMAR, Carta Geológico-Económica de la R. Argentina, 1:200.000.
- Kansas Geological Service. Kansas. High Plains Aquifer Atlas. <http://www.kgs.ku.edu/>
- Khater, A., 2003. Intensive groundwater use in the Middle East and North Africa. In: Llamas, R. and E. Custodio, 2003 (eds.): Intensive use of groundwater. Challenges and Opportunities, A.A. Balkema Publishers, 355-386. ISBN 9058093905.
- Laney, R. y C. Davidson, 1986. Aquifer-nomenclature guidelines. U.S. Geol. Surv. Op.F. Rep. 86-534.
- Laurencena, P. y E. Kruse, 2008. Caracterización de acuíferos profundos en un sector de la Cuenca Neuquina. IX Congreso Latinoamericano de Hidrología Subterránea, Quito.
- Llamas, R. y E. Custodio, 2003. Intensive use of groundwater: a new situation which demands proactive action. In: Llamas, R. y E. Custodio, 2003 (eds.): Intensive use of groundwater. Challenges and Opportunities, A.A. Balkema Publishers Lisse, 13-31.
- Loyola, N., C. Arroyo, C. Schulz y R. García, 2016. Caracterización hidroquímica del acuífero alojado en las coladas basálticas en el Departamento de Puelén, Provincia de La Pampa. IX Congreso Argentino de Hidrogeología. Tomo Hidrogeología Regional, 71-78.
- Malán, J.M., E.E. Mariño y C.H. Miglianelli, 2005. Estudio hidrogeológico de la meseta basáltica, Provincia de La Pampa. Temas Pampeanos. Recursos

- hídricos, medio ambiente e historia, 51-75, Fundación Chadileuvú, Ed. Biblioteca Pampeana, Santa Rosa.
- Manzano, M., 2005. "Hidrología de los humedales dependientes del agua subterránea e implicancias ecológicas". Actas II Sem. Hisp.Latinoam. Temas Actuales de Hidrolog.Subt. R. Cuarto.
- Meconi, G., 2015. Neuquén Group and Rayoso Formation Aquifer System (S.A.Ne.Ra.), Neuquén Basin, Argentina: proposed denomination, study and Integrated Water Resource Management (IWRM). 42nd International Association of Hydrogeologists Congress, Roma.
- Meconi, G., 2016. Sistema Acuífero Grupo Neuquén y Formación Rayoso (S.A.Ne.Ra.). Sistematización para uso sustentable en reservorios no convencionales de la Cuenca Neuquina. IX Congreso Argentino de Hidrogeología. Tomo Hidrogeología Regional, 228-237.
- Meconi, G., P. Bedini, C. Bréard, F. Larriestra, M. Noya y K. Ulloa, 2016. Mapa hidrogeológico de una región del sector surmendocino de la Cuenca Neuquina, Argentina. XIII Congreso Latinoamericano de Hidrogeología ALHSUD, Mérida, México.
- Meconi, G. *et al.*, en prensa. Estudio hidrogeológico en sur de Mendoza y oeste de La Pampa (Argentina) para estimación de potencial uso sostenible y protección. XIV Congreso Latinoamericano de Hidrogeología, X Cong. Argentino Hidrogeología; a realizarse en Salta en 2018.
- Muskat, M., 1932. Problems of underground water-flow in oil industry. Am.Geop.Un. Trans.399-401.
- Navarro Alvargonzález, A., A. Fernández Uría, y J. Doblas Domínguez, 1993. Las aguas subterráneas en España. Instituto Geológico y Minero de España (IGME).
- Núñez, E., 1976. Descripción geológica de la hoja 31e Chical-co, Provincias de La Pampa y Mendoza. SEGEMAR, Carta Geológico-Económica de la R. Argentina, 1:200.000, inédito.
- Pazos J., J. Bessone, J. Vivas, A. Vaca, C. Wetten y C. Valero, 1993. Recursos Hídricos Subterráneos y Aguas Termales. En: Ramos, V. (ed.), Geología y Rec. Naturales de Mendoza, XII Cong. Geológico Argentino y II Cong. Exploración de Hidrocarburos, Mendoza; Relatorio: 551-599.
- Poland, J., B. Lofgren, y F. Riley, 1972. Glossary of selected terms useful in studies of the mechanics of aquifer systems and land subsidence due to fluid withdrawal. U.S. Geolog. Survey, Water Supply Pap. 2025
- Primo, L. y O. González, 1973. Relevamiento de las aguas subterráneas de la Cuenca Neuquina y su posible utilización en proyectos de recuperación secundaria y otros usos. II Simposio de Recuperación Secundaria de Petróleo y Gas, Bariloche, 32 pp.
- Rassenfoss, S., 2018. Argentina's Shale Play is Beginning to Live up to Expectations. Journal of Petroleum Technology, 22 May 2018. <https://www.spe.org/en/jpt/jpt-article-detail/?art=4223>
- Rodríguez, E. 2016, comunic. personal. Microscopía de cortes delgados de basaltos Sur Mendoza.
- Scatizza, C., M. Hernández, S. Preiato, C. Di Lorenzo y M. Wocca, 2013. Aprovechamiento sustentable de los recursos hídricos en el desarrollo de los yacimientos de hidrocarburos no convencionales. En: González, N., E. Kruse, M. Trovatto y P. Laurencena (eds.): Temas Actuales de la Hidrología Subterránea 2013. Ed. Universidad Nacional de La Plata, 297-302.

- Sosic, M., 1978. Recursos Hídricos Subterráneos. VII Cong. Geo. Argentino, Neuquén, Relat. 309-323.
- Späth, F, S. Periale, S. Perdomo y L. Arioni, 2017. Métodos gravimétricos y eléctricos aplicados a la exploración de hidrocarburos en ámbito de borde de cuenca neuquina. XX Cong. Geo. Arg.
- Tóth, J., 1980. Cross-Formational Gravity-Flow of Groundwater: A Mechanism of the Transport and Accumulation of Petroleum (The Generalized Hydraulic Theory of Petroleum Migration). In: Roberts III, W. and R. Cordell (Eds.): Problems of petroleum migration. AAPG Stud. in Geology, N°10:121-167.
- Zambrano, J. y E. Torres, 1996. Mapa Hidrogeológico con ref. a cuencas de aguas subterráneas, Mendoza, 1:500.000, Hidrogeología Prov. Mendoza. Inventario Recursos de Reg. Andina Arg.

