

MODELAMIENTO EN LA GESTIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA

Parte I: aspectos claves para el desarrollo y la evaluación de modelos conceptuales

RESUMEN

El proceso de modelamiento, en general, incluye varias fases que deben ser implementadas en forma sistemática, tales como la identificación del problema y objetivos, el desarrollo del modelo conceptual y modelo numérico, las predicciones y el análisis de incertidumbre. Este documento proporciona aspectos específicos que deben considerarse para el desarrollo y evaluación de modelos conceptuales del flujo de agua subterránea. El modelo conceptual, como una representación descriptiva del sistema de agua subterránea, incorpora la descripción e interpretación de las condiciones geológicas e hidrológicas incluyendo las fronteras, conceptualización del flujo, los componentes del balance de agua y las propiedades hidráulicas del acuífero. Por otro lado, en el marco de evaluación de los recursos hídricos, la Autoridad Nacional del Agua (ANA), a través de la Dirección de Conservación y Planeamiento de Recursos Hídricos, estima las reservas explotables, caracteriza hidráulicamente a los acuíferos, desarrolla prospección geofísica, sistematiza información; así como aplica modelos de flujo en acuíferos de la costa peruana. Además, la Dirección de Gestión de la Calidad de los Recursos Hídricos de la ANA, en los estudios de impacto ambiental, evalúa un componente importante de hidrogeología que incluye el modelamiento. Los aspectos descritos en este artículo deben ser considerados como un punto de referencia desde que proporcionan alcances generales para los estudios de modelamiento.

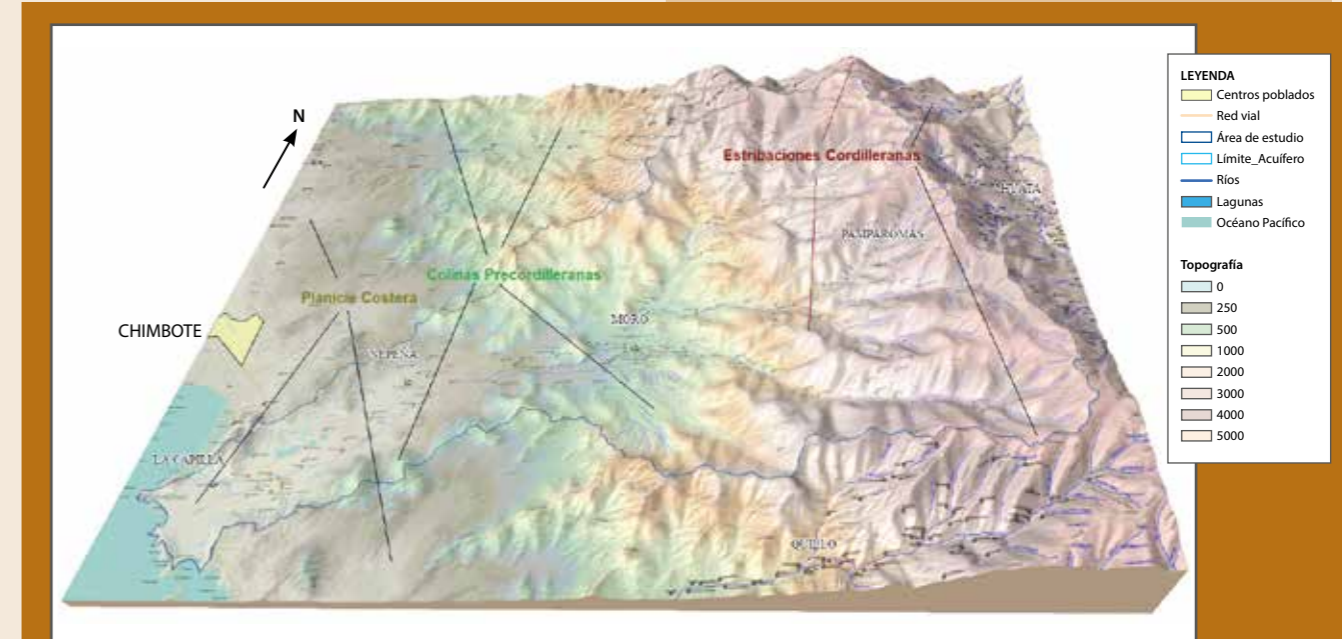
DELIMITACIÓN, DESCRIPCIÓN y GEOMORFOLOGÍA

En función a los objetivos del estudio y alcances de la modelización, pueden diferenciarse sistemas acuíferos regionales (a nivel de cuencas, intercuenas, unidades geológicas, valles, entre otros), límites de áreas de influencia físicas y de investigaciones con intereses rígidos. Por otro lado, la caracterización física de las zonas de interés incluye la delimitación de sectores cuya fisiografía influye directamente en el ciclo hidrológico, esto es, las formas del relieve y su implicancia en cada uno de los procesos involucrados en la hidrodinámica superficial y subterránea (Figura 1). Por ello es importante definir, por ejemplo, las zonas en las cuales existen mayores probabilidades de escorrentía, infiltración, recargas y descargas de forma natural, también es relevante debido a la influencia de los procesos geológicos en la formación de sedimentos inconsolidados, zonas fracturadas, entornos de disolución y otros, que son favorables para la presencia y movilidad de aguas subterráneas.

EL MODELO CONCEPTUAL

El modelo conceptual constituye la columna vertebral del proceso de modelamiento y es la representación descriptiva del sistema de agua subterránea. Incorpora la interpretación de las condiciones geológicas e hidrológicas, así como los procesos más importantes para el modelamiento, como las fronteras, la conceptualización del flujo, componentes del balance de agua y las propiedades hidráulicas del acuífero. El modelo conceptual debe explicar en forma cuantitativa y cualitativa el comportamiento de las aguas subterráneas de la zona bajo investigación.

Figura 1. Zonificación geomorfológica de la cuenca Nepeña



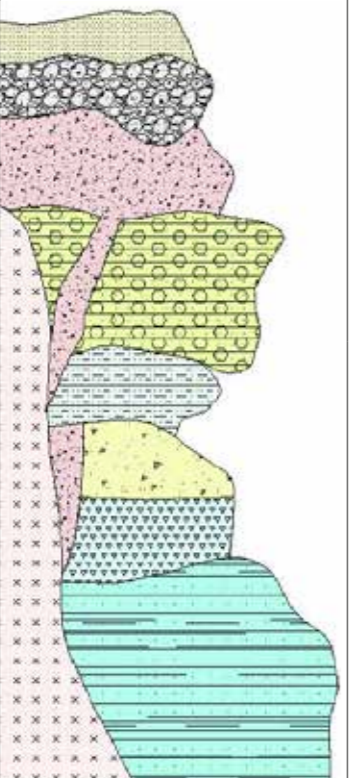
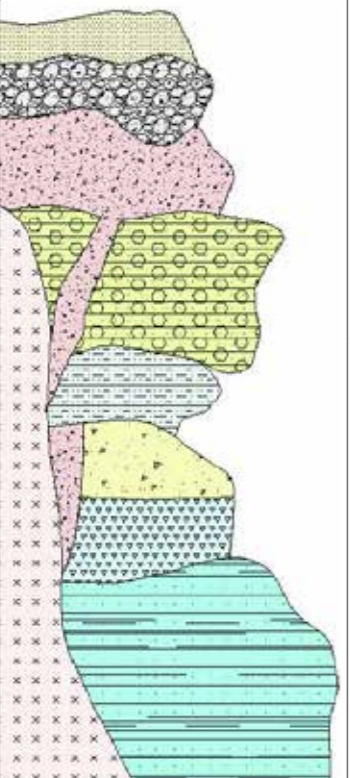
Fuente: DCPRH, Evaluación de recursos hídricos de la cuenca Nepeña, 2016

LITOESTRATIGRAFÍA Y GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

Es innegable la influencia que ejerce el medio geológico en el control de los procesos de la hidrología superficial y subterránea. En este contexto, es importante reconocer las unidades litoestratigráficas en función a sus condiciones genéticas, mineralógicas y estructurales. En las evaluaciones hidrogeológicas, se presenta la descripción de las unidades litológicas que generalmente se describen a nombre de *formaciones* (Figura 2), *unidades*, *superunidades*, *grupos*, *volcánicos* y *sedimentos inconsolidados* del Cuaternario Reciente. Este estándar sigue las convenciones internacionales que han sido adoptadas en Perú por la autoridad máxima en las evaluaciones geológicas (INGEMMET).

De estas descripciones se infieren finalmente las unidades o grupos litológicos con características hidrogeológicas comunes que se clasifican en función a la presencia y movilidad de las aguas subterráneas, tal y como se muestra en la secuencia litoestratigráfica con objetivos hidrogeológicos (Figura 2). Dichas observaciones provienen de fuentes bibliográficas, mapeos superficiales y registros de perforaciones, que pueden ser complementadas con prospección geofísica y análisis geoquímico en rocas, suelos y agua.

Figura 2. Secuencia litoestratigráfica de la cuenca Nepeña

| ERA | ÉPOCA | SECUENCIA | FORMACIÓN | COMPOSICIÓN | HIDROGEOLOGÍA |
|-----------|---------------------|---|-----------|---|--|
| Cenozoico | Neógeno Cuaternario |  | Qr-e | Depósitos eólicos, arenas finas, limos | Acuífero detrítico |
| | | | Qr-Al | Depósitos fluviales, gravas, conglomerados, arenas medias | Acuífero detrítico |
| | | | Ti-ca | Volcánico Calipuy, tobas dacíticas | Acuífero Fisurado |
| | | | KsT-sr | Super unidad Santa Rosa, granito | Acuitardo - Acuífero |
| Mesozoico | Superior |  | Ks-hy | Formación Huaylas, conglomerados | Acuífero fisurado |
| | | | Ki-g | Ki-saca | Formación Santa - Carhuaz, areniscas y lutitas |
| | Cretácico | | Ki-z | Formación La Zorra, tobas | Acuitardo - Acuífero |
| | | | Ki-j | Formación Junco, traquiandesitas | Acuífero Fisurado |
| | | | Inferior | Ki-g | Ki-ch |

Fuente: DCPRH, *Evaluación de recursos hídricos de la cuenca Nepeña*, 2016

La evolución de las unidades litoestratigráficas está condicionada a los fenómenos de geodinámica, los cuales, en función a las condiciones tensionales y fisicoquímicas de los macizos rocosos, generan alteraciones en su configuración y estado (Figura 3). Dichas estructuras influyen en la movilidad y estado de aguas subterráneas, pues pueden alterar los regímenes hidrológicos, condicionar la instalación de infraestructuras de ingeniería, definir los sectores de almacenamiento o distribución y generar escenarios críticos como la dispersión preferencial de aguas con impactos negativos sobre el ambiente.

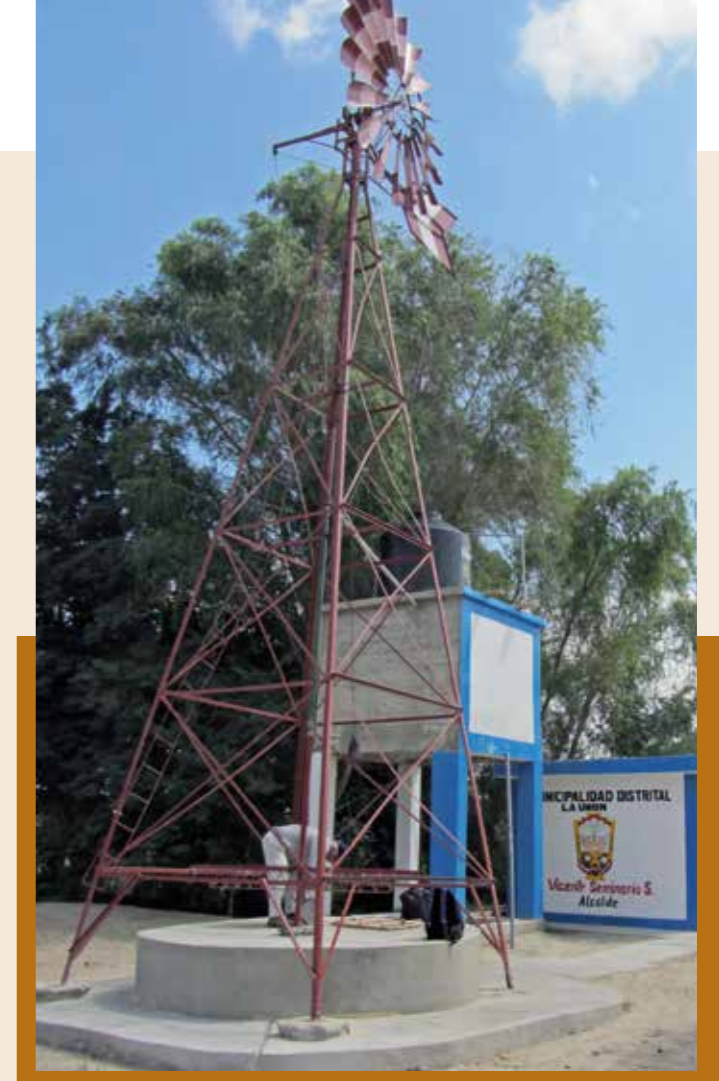
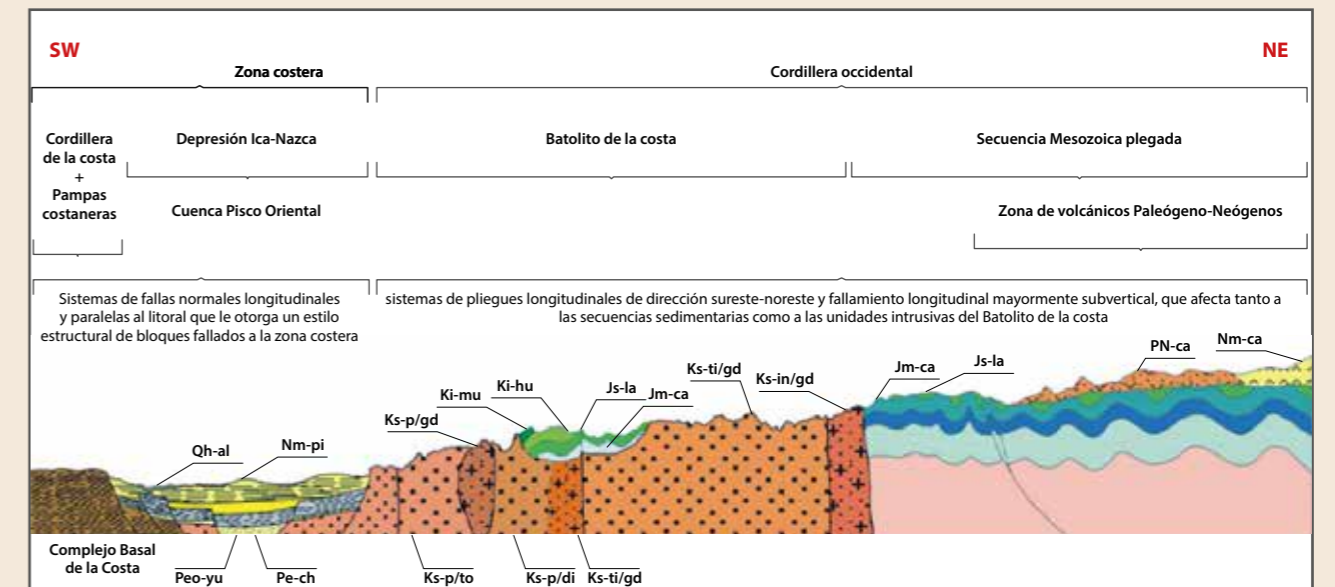


Figura 3. Esquema litoestructural de la cuenca Ica



Fuente: INGEMMET, *Hidrogeología de la cuenca Ica*, 2010

HIDROESTRATIGRAFÍA

Luego de haber desarrollado el acople de datos litológicos, geofísicos, estructurales, hidroquímicos e hidráulicos, se debe desarrollar la zonificación de sectores con características hidráulicas favorables a la recarga, almacenamiento y movilidad de las aguas subterráneas, definiendo a depósitos inconsolidados o unidades rocosas como acuíferos, acuitardos y acuífugos, esto a razón de determinar las probabilidades del hidrodinamismo subterráneo. Se pueden caracterizar, entre ellos, los espesores, las características litológicas, los modos de ocurrencia, las variables hidráulicas, sus orígenes y tipos, lo que fortalece la conceptualización del medio físico.

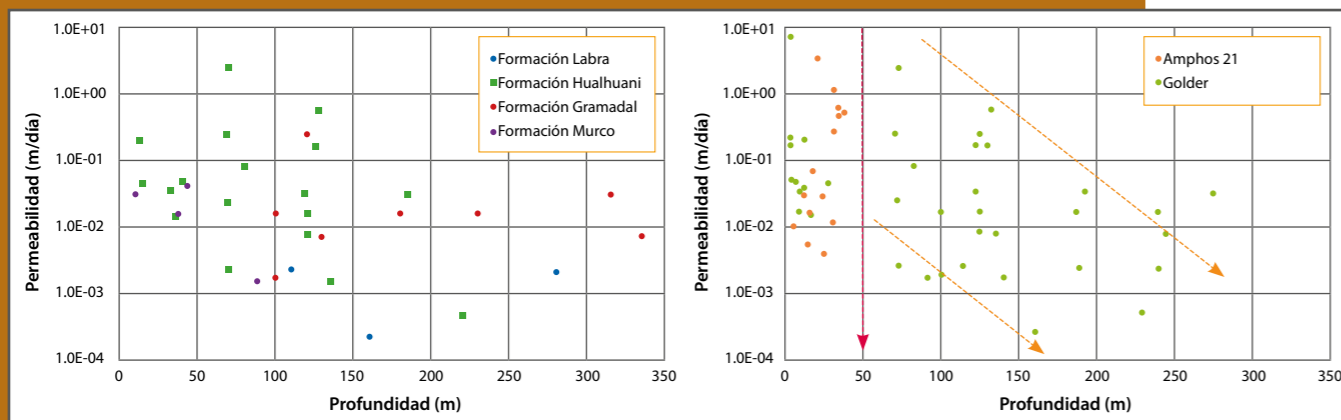
ANÁLISIS DE RECARGAS

Antes del análisis de la recarga de agua, un estudio hidrológico debe ser desarrollado para evaluar el comportamiento histórico de la precipitación, evapotranspiración, infiltración, flujo base, escorrentía. De ello y de la caracterización hidroestratigráfica, se establecen las zonas susceptibles para la entrada de agua hacia el sistema de interés. Del mismo modo, a partir de balances volumétricos obtenidos de los registros e inventarios de fuentes, se pueden estimar valores de recarga, los cuales responden a una distribución espacial y temporal que provienen esencialmente de procesos naturales, influenciados por la precipitación y evapotranspiración, por la interrelación con fuentes superficiales, por zonas de interconexión hidráulica aledañas, o por procesos en los que intervienen las actividades humanas (valles agrícolas, infraestructuras de almacenamiento y conducción, entre otros). Existen diversos métodos para estimar la recarga de aguas subterráneas: desde los balances hidrológicos hasta el método de fluctuaciones del nivel freático; el método elegido debe ser técnicamente sustentado y acorde a la realidad de la zona en estudio y a la disponibilidad de información. Además, esta parte debe mostrar una zonificación de la recarga (Figura 5).

PROPIEDADES HIDRÁULICAS

Se describen las distintas características hidráulicas del medio poroso saturado y, dependiendo de la heterogeneidad del sistema, se pueden zonificar los valores de parámetros y asignarlos a regiones determinadas, asumiendo patrones de comportamiento hidráulico en función a granulometría, geología estructural, efectos de escala, tipo de acuífero. Los valores pueden ser estimados en campo, en laboratorio, o referirse a fuentes bibliográficas (en el caso extremo donde no exista información). Por ejemplo, la Figura 4 muestra la variación de la conductividad hidráulica en diferentes estratos.

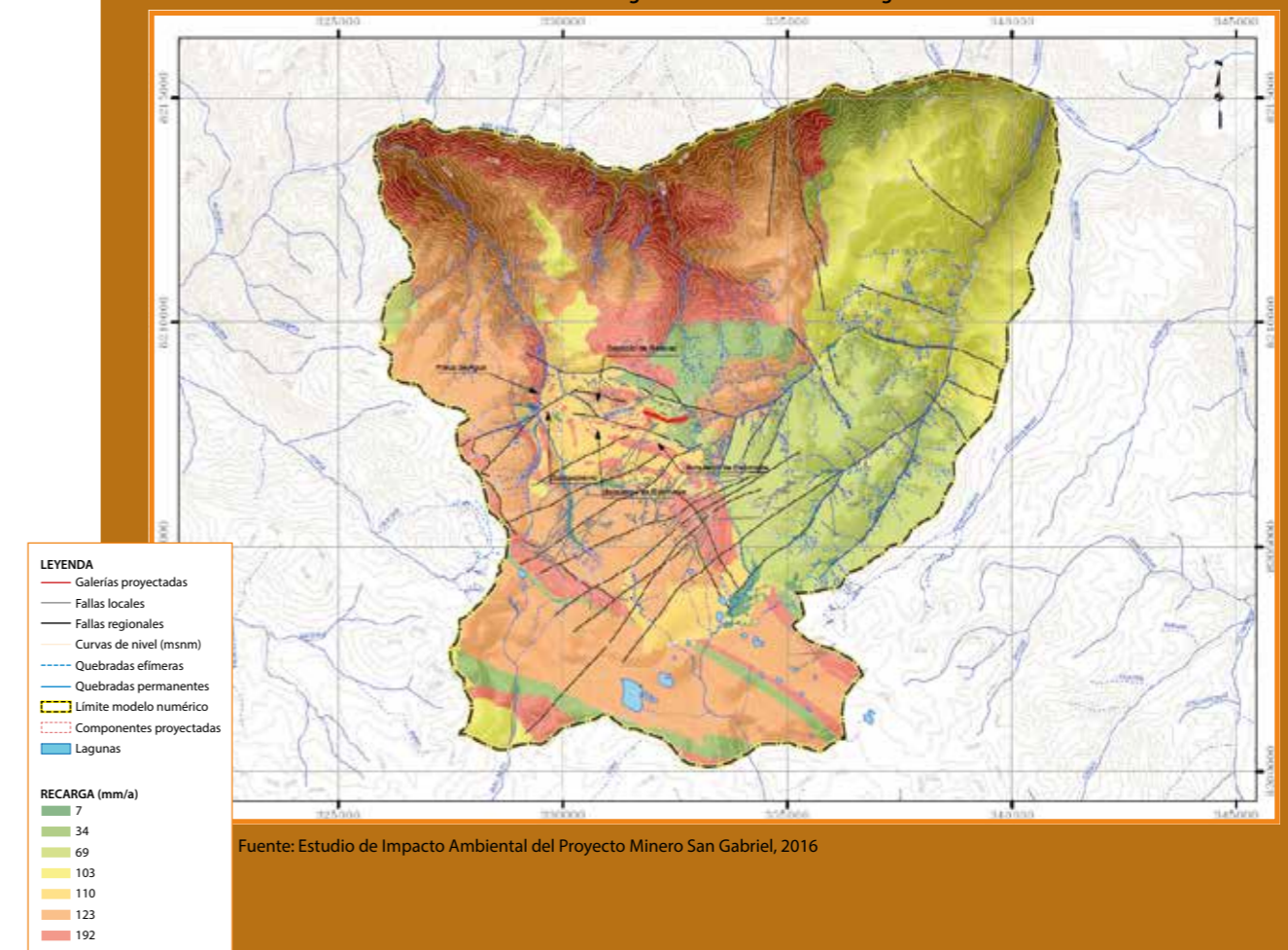
Figura 4. Correlación de parámetros hidráulicos



Fuente: Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto Minero San Gabriel, 2016



Figura 5. Zonificación de recargas



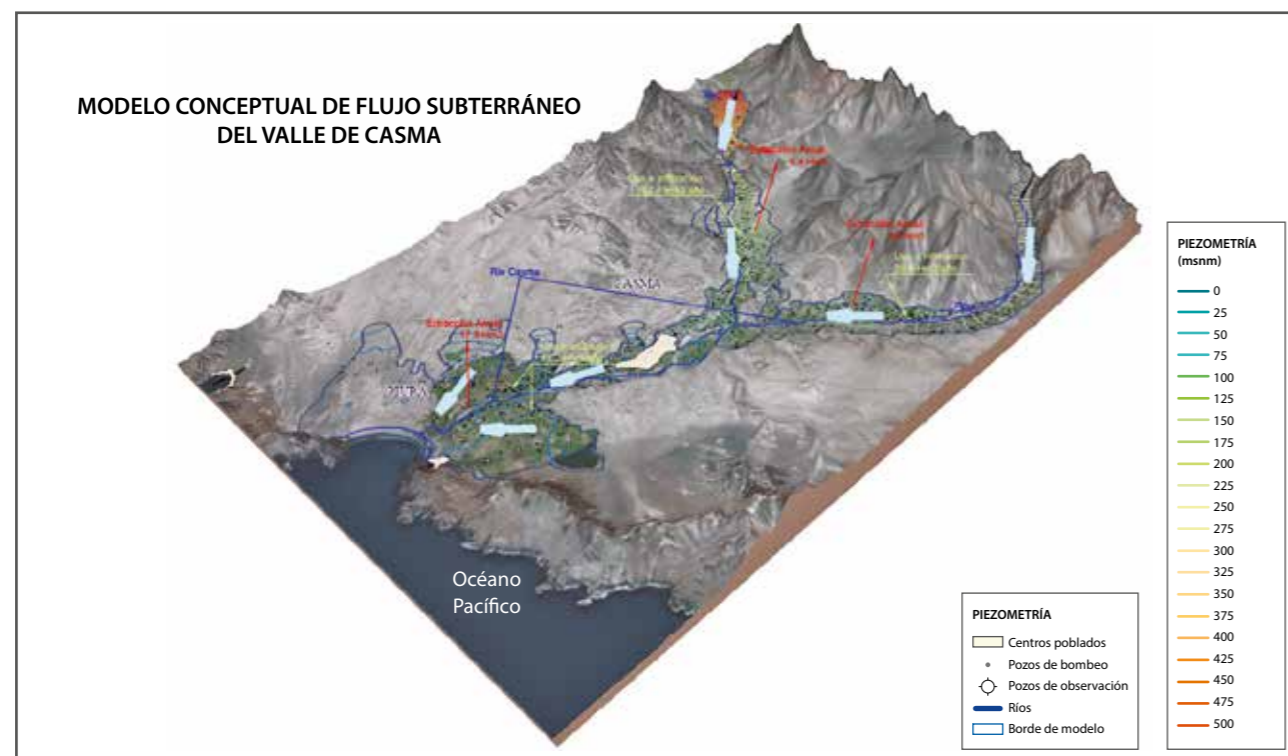
Fuente: Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto Minero San Gabriel, 2016



FLUJO SUBTERRÁNEO

De acuerdo a los datos observados y a las mediciones efectuadas en los distintos puntos de observación, será posible describir la dinámica del flujo subterráneo, desde las zonas de recarga hasta los afloramientos y zonas de extracción, indicando, entre otros, la velocidad de flujo, el grado de confinamiento, el análisis piezométrico, la gradiente hidráulica y el análisis de piezometría y profundidad, lo que facilitará posteriores inferencias y balances complementarios. Es factible entonces la elaboración de esquemas conceptuales del flujo de aguas subterráneas (Figura 6) y la visualización en gráficos y mapas de la presencia y movimiento del flujo.

Figura 6. Modelo conceptual de flujo subterráneo, acuífero Casma



Fuente: Estudio de Evaluación de Recursos Hídricos de la Cuenca del Río Casma, 2016

En resumen, los aspectos mínimos que necesitan abordarse en el desarrollo del modelo conceptual son (Reilly y Harbaugh, 2004; Wels, 2012):

1. **Recopilación de estudios e información básica.** Información relacionada con formaciones geológicas, dirección del flujo, fronteras hidrológicas, parámetros hidráulicos, extracción o inyección de pozos, cargas observadas, etc. Estudios hidrológicos, geológicos-hidrogeológicos, hidroquímicos.
2. **Descripción general del sistema de aguas subterráneas.** Con base en los estudios y la información básica, describir el sistema acuífero bajo estudio y la naturaleza de las fronteras.
3. **Conceptualización del flujo de agua subterránea.** Con la información piezométrica, evaluar la configuración y sentido del flujo de agua subterránea en la zona de estudio. Esta parte permite entender el comportamiento dinámico del acuífero en espacio y tiempo, establecer gradientes. Poner énfasis en la cota de terreno para los pozos, los mismos que deben ser congruentes con los niveles piezométricos.
4. **Descripción del tipo de acuíferos.** En esta parte, debe describirse y evaluarse qué tipos de acuíferos (su geometría, interconexión, geología, geomorfología) fueron considerados para el modelo numérico, y si estos están bien conceptualizados, acorde a la zona bajo investigación.
5. **Componentes y balance hídrico preliminar.** Describir y evaluar los mecanismos de recarga y descarga y/o extracciones, tales como la evapotranspiración, descarga de aguas subterráneas y flujo base, interacción del agua superficial y subterránea, usos de agua, etc., y su variación en el tiempo. Todos los valores estimados deben tener un sustento técnico con metodologías aplicadas acordes a la realidad de cada sistema en estudio. Una vez estimados los componentes de agua, deberá desarrollarse un balance hídrico preliminar que muestre la dinámica de entradas y salidas del sistema acuífero.
6. **Propiedades hidráulicas.** En esta parte, se debe describir y evaluar las propiedades de transmisión y almacenamiento del acuífero (conductividad hidráulica, coeficiente de almacenamiento y porosidad). Para cada zona o grupo, debe analizarse la pertinencia de los valores asumidos acordes al marco hidrogeológico (litología, geología). Para cada unidad hidrogeológica, establecer un rango de valores, basados en las pruebas de bombeo desarrolladas y en la literatura existente.
7. **Visualización en 3D, figuras y cortes.** La visualización en 3D del modelo conceptual es importante para evaluar las simplificaciones, condiciones de borde, sentido del flujo, variación espacial de los parámetros, etc. Mostrar en planos la zonificación de la conductividad hidráulica para cada unidad hidrogeológica; según la magnitud del dominio computacional, debe incluirse secciones y cortes del sistema acuífero.

CONCLUSIONES

El modelo conceptual es la parte inicial y más importante del proceso de modelamiento para tener comprensión completa del sistema hidrogeológico y del flujo de agua subterránea. Este proceso involucra fundamentalmente la descripción del sistema de agua subterránea bajo investigación (fronteras, formaciones geológicas, etc.); la conceptualización del flujo para comprender el comportamiento dinámico del acuífero en espacio y tiempo; la descripción del tipo de acuífero (considerando su geometría, interconexión, geomorfología); el balance hídrico preliminar (recargas y descargas); los parámetros hidráulicos y su evaluación en la zona de estudio; la visualización en tres dimensiones para evaluar en forma completa las simplificaciones, las fronteras, el flujo, etcétera.

Referencias bibliográficas

1. AUTORIDAD NACIONAL DEL AGUA (ANA). (2006). Estudios de evaluación de recursos hídricos de las cuencas de los ríos Casma, Jequetepeque, Piura. Dirección de Conservación de Recursos Hídricos (DCPRH).
2. AUTORIDAD NACIONAL DEL AGUA (ANA). (2016). Zonificación de áreas favorables para la explotación en el Valle Tambo. Dirección de Estudios de Proyectos Hidráulicos Multisectoriales (DEPHM).
3. BARNETT et al. (2012). Australian groundwater modelling guidelines, Waterlines report, Canberra: National Water Commission.
4. Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto Minero San Gabriel (2016). Amphos 21, SEIA, DGCRH-DCPRH-ANA.
5. Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto Minero La Arena (2015). Montgomery Associates, SEIA, DGCRH-DCPRH-ANA.
6. FETTER, C. W. (2008). Contaminant Hydrogeology (2nd edition), Prentice Hall.
7. HARBAUGH, A. W. (2005). MODFLOW-2005, The U. S. Geological Survey modular ground-water model—the Ground-Water Flow Process, U. S. Geological Survey Techniques and Methods 6-A16 p.
8. HOWARD S., SIMON A., XIN L. (2010). Groundwater Modelling in Arid and Semi-Arid Areas. Cambridge University Press.
9. INSTITUTO GEOLÓGICO MINERO Y METALÚRGICO (INGEMMET). (2010). Hidrogeología de la Cuenca Ica
10. KRESIC, N. (2006). Hydrogeology and Groundwater Modeling (second edition), CRC Press.
11. REILLY, T. E., HARBAUGH, A. W. (2004). Guidelines for Evaluating Ground-Water Flow Models, U. S. Geological Survey (USGS), U. S.
12. SISTEMA DE EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL (SEIA). (2016). Instrumentos de Gestión Ambiental de Sectores Mineros y Energéticos.
13. WELS, C. (2012). Guidelines for Groundwater Modelling to Assess Impacts of Proposed Natural Resource Development Activities, British Columbia, Ministry of Environment, Water Protection & Sustainability Branch.