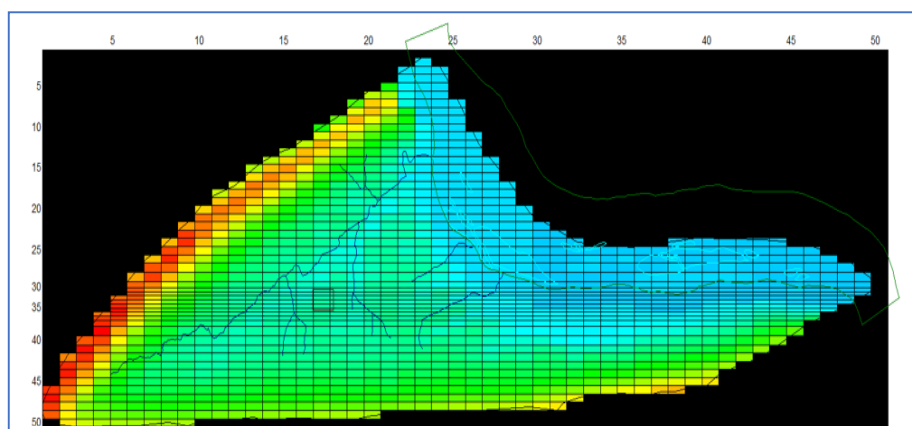


# AUTORIDAD NACIONAL DEL AGUA



## DIRECTRICES PARA EL MODELAMIENTO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS EN PERÚ

### ASPECTOS CLAVES PARA EL DESARROLLO Y EVALUACIÓN DE MODELOS CONCEPTUALES Y NUMÉRICOS

Este documento proporciona directrices para el desarrollo y evaluación de modelos conceptuales y numéricos del flujo de agua subterránea.

Eusebio Ingol Blanco  
Marko Castañeda Zavaleta  
Mayo, 2017

## Contenido

<b>Resumen .....</b>	<b>2</b>
<b>1. Introducción.....</b>	<b>3</b>
<b>2. El Modelo Conceptual.....</b>	<b>5</b>
<b>2.1 Delimitación, descripción y geomorfología .....</b>	<b>6</b>
<b>2.2 Litoestratigrafía y geología estructural .....</b>	<b>6</b>
<b>2.3 Hidroestratigrafía.....</b>	<b>8</b>
<b>2.4 Propiedades Hidráulicas .....</b>	<b>8</b>
<b>2.5 Análisis de Recargas.....</b>	<b>9</b>
<b>2.6 Flujo Subterráneo.....</b>	<b>10</b>
<b>3. Aspectos Mínimos para el modelamiento Conceptual .....</b>	<b>11</b>
<b>4. El Modelo Numérico .....</b>	<b>12</b>
<b>4.1 Diseño y Selección del Modelo Numérico .....</b>	<b>13</b>
<b>4.2 Dominio y Discretización .....</b>	<b>14</b>
<b>4.3 Condiciones de Borde.....</b>	<b>14</b>
<b>4.4 Condiciones Iniciales .....</b>	<b>17</b>
<b>4.5 Parámetros del modelo .....</b>	<b>18</b>
<b>4.6 Configuración del modelo.....</b>	<b>19</b>
<b>4.7 Calibración y Análisis de Sensibilidad .....</b>	<b>19</b>
<b>4.7.1 Calibración del Modelo .....</b>	<b>19</b>
<b>4.7.2 Metodología de calibración.....</b>	<b>20</b>
<b>4.7.3 Evaluación de los resultados de la calibración.....</b>	<b>22</b>
<b>4.7.4 Análisis de sensibilidad .....</b>	<b>22</b>
<b>4.7.5 Validación del modelo .....</b>	<b>23</b>
<b>5. Predicción/ escenarios .....</b>	<b>23</b>
<b>6. Análisis de Incertidumbre .....</b>	<b>24</b>
<b>7. Aspectos Mínimos para el Modelamiento Numérico.....</b>	<b>24</b>
<b>8. Conclusiones .....</b>	<b>27</b>

**Directriz para el Modelamiento de Aguas Subterráneas en Perú**  
**Aspectos Claves Para el Desarrollo y Evaluación de Modelos Conceptuales y Numéricos**

## **Resumen**

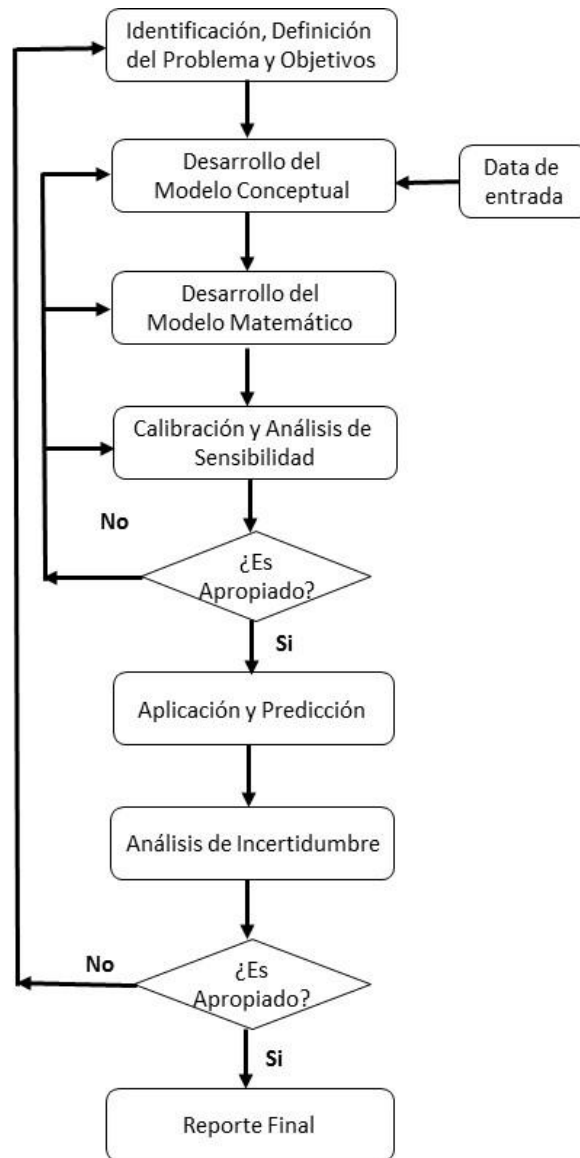
El modelamiento del flujo de agua subterránea es fundamental para entender el comportamiento del sistema acuífero, predecir su respuesta y generar información clave para la toma de decisiones. En esencia, se requiere conocer el volumen de agua que puede ser extraído, la localización de pozos de bombeo, la recarga, el transporte de contaminante, la respuesta del sistema a estrategias implementadas, entre otros aspectos. En esa línea, 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 análisis de incertidumbre. Este documento proporciona aspectos que deben ser considerados para el desarrollo y evaluación de modelos conceptuales y numéricos del flujo de agua subterránea. El modelo conceptual es la representación descriptiva del sistema de agua subterránea, incorpora la descripción e interpretación de las condiciones geológicas e hidrológicas considerando las fronteras, conceptualización del flujo, componentes del balance de agua y las propiedades hidráulicas del acuífero. Por otro lado, el modelo numérico como representación matemática de los procesos físicos de la hidrología subterránea, basado en la Ley de Darcy y conservación de la masa, incluye la selección del software de modelamiento, el dominio computacional, la discretización numérica espacial y temporal, condiciones iniciales y condiciones de frontera. Asimismo, se incorpora el proceso de calibración y análisis de sensibilidad, predicciones y análisis de incertidumbre. Este último es un aspecto esencial que todo modelamiento debe incluir para evaluar el impacto del cambio de los valores de los parámetros sobre las predicciones. Los aspectos descritos en este documento deben ser considerados como referencia desde que proporcionan alcances generales para los estudios de modelamiento.

## 1. Introducción

En el Perú, existen más de 100 acuíferos de los cuales 42, localizados en zonas costeras, han sido evaluados con una masa anual que supera los 1'900 HM<sup>3</sup> de reservas racionalmente explotables (ANA, 2016). Estos acuíferos almacenan una gran cantidad de agua y constituye una fuente importante para la agricultura (sobre todo en el sur del país donde el déficit hídrico es muy frecuente), la población, la industria, entre otros usos. Asimismo, la creciente demanda por los recursos hídricos subterráneos en muchas regiones del país ha puesto en evidencia la necesidad de generar información, adecuar políticas y estrategias de gestión que garanticen la sostenibilidad de los acuíferos. Para ello, teniendo en cuenta además que la dinámica del flujo de agua subterránea en el medio poroso es muy compleja, se requiere el uso de herramientas computacionales para simular y predecir su respuesta.

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. El proceso de modelamiento involucra varias fases que deben ser implementadas en forma sistemática (Reilly and Harbaugh, 2004; Wels, 2012; Sinclair Knight Merz, 2012). *La identificación del problema, objetivos y planificación* que incluyen el análisis del sistema y elementos a ser modelados, la relación e interacción entre ellos, el grado de precisión del modelo que explica el nivel de confianza de las predicciones y depende del nivel de datos disponibles que son usados para el desarrollo y el proceso de calibración, los objetivos consensuados y el usos previsto del modelo. *La conceptualización* es un aspecto clave para el desarrollo del modelo numérico e implica identificar y describir lo procesos que controlan la dinámica y almacenamiento del agua subterránea y el transporte de contaminantes en el sistema hidrogeológico, incluye los procesos físicos, el análisis de las recargas y descargas de agua, la conceptualización del flujo, entre otros aspectos. La etapa de *diseño y configuración del modelo numérico* involucra la selección del método numérico o software de modelamiento, la dimensión del dominio computacional, la discretización espacial y temporal, la configuración de parámetros, las condiciones de borde y condiciones iniciales. *La calibración y análisis de sensibilidad* involucra

un proceso a través del cual los parámetros del modelo son ajustados hasta que los resultados de las salidas del modelo concuerden con valores históricos observados. Dos métodos pueden ser usados para calibrar un modelo, un proceso manual de prueba y error o mediante un procedimiento automático de ajuste de parámetros. El análisis de sensibilidad implica evaluar los parámetros de entrada al modelo y como ellos afectan los resultados como las cargas y flujos. *La predicción y escenarios* son usados para representar cambios futuros en el sistema debido a condiciones climáticas, bombeo y drenaje, estrategias de gestión, etc., y son diseñados para alcanzar los objetivos planteados en el modelamiento. *El análisis de incertidumbre* es un aspecto esencial que debe ser abordado en todo estudio de modelamiento del flujo de agua subterránea desde que los modelos son una simplificación de la realidad y cuyas ecuaciones diferenciales parciales que representan el proceso físico son resueltas con métodos numéricos, sus resultados son inciertos; en consecuencia para la toma de decisiones los resultados del modelo deben incorporar la incertidumbre en las predicciones. El presente documento tiene como objetivo proporcionar aspectos generales para el desarrollo de modelos conceptuales y numéricos del flujo de agua subterránea. La figura 01 muestra el proceso de modelamiento.



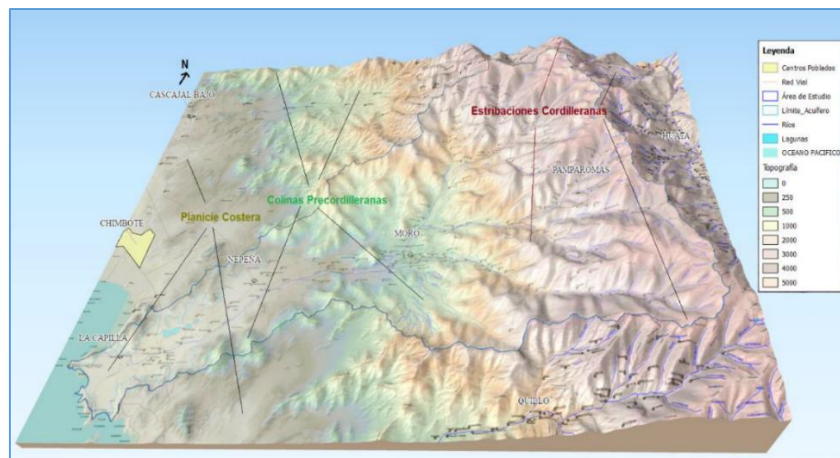
**Figura 01:** Proceso de modelamiento del flujo de agua subterránea

## 2. 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, 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.

## 2.1 Delimitación, descripción y geomorfología

En función a los objetivos del estudio y los alcances de la modelización, pueden diferenciarse sistemas acuíferos regionales (a nivel de cuencas, intercuenas, unidades geológicas, valles, 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 02). 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 sedimentos inconsolidados, zonas fracturadas, entornos de disolución y otros, que son favorables para la presencia y movilidad de aguas subterráneas.



**Figura 02:** Zonificación Geomorfológica de la Cuenca Nepeña

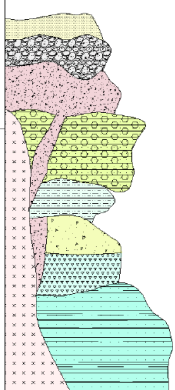
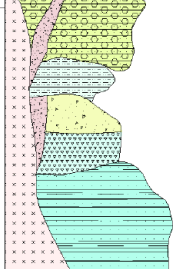
Fuente: DCPRH, Evaluación de Recursos Hídricos de la Cuenca Nepeña, 2016

## 2.2 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 03), Unidades, Súper Unidades,

Grupos, Volcánicos y sedimentos inconsolidados del Cuaternario Reciente, este estándar sigue las convenciones internacionales y 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 02). 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.

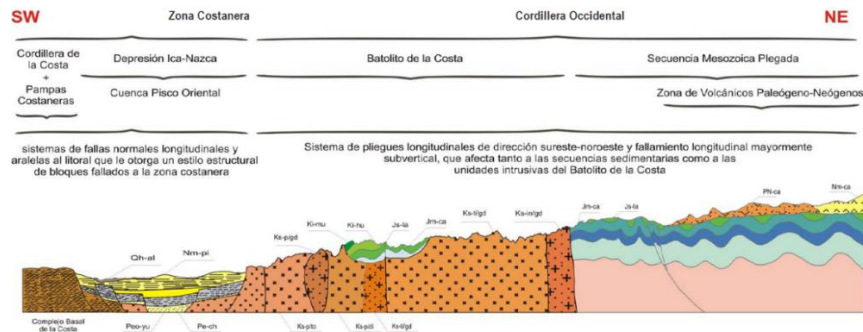
Era	Época	Secuencia	Formación	Composición	Hidrogeología
Cenozoico	Neógeno Cuaternario		Qr-e	Depósitos Eólicos, arenas finas, limos	Acuífero Detritico
			Qr-Al	Depósitos Fluvioaluviales, gravas, conglomerados, arenas medias	Acuífero Detritico
			Ti-ca	Volcánico Calipuy, tobas dacíticas	Acuífero Fisurado
			KsT-er	Super Unidad Santa Rosa, granito	Acuitardo - Acuífero
Mesozoico	Superior		Ks-hy	Formación Huaylas, conglomerados	Acuífero Fisurado
	Cretácico		Kl-g	Formación Santa - Carihuaz, areniscas y lutitas	Acuífero - Acuitardo
			Kl-z	Formación La Zorra, tobas	Acuitardo - Acuífero
			Kl-j	Formación Junco, traquiandesitas	Acuífero Fisurado
	Inferior		Kl-g	Kl-ch	Formación Chimú, cuarcitas, areniscas, lutitas

**Figura 03:** Secuencia Litoestratigráfica de la Cuenca Nepeña

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 04). Dichas estructuras influyen en la movilidad y estado de aguas subterráneas, siendo que las mismas 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 04:** Esquema Lito-estructural de la Cuenca Ica

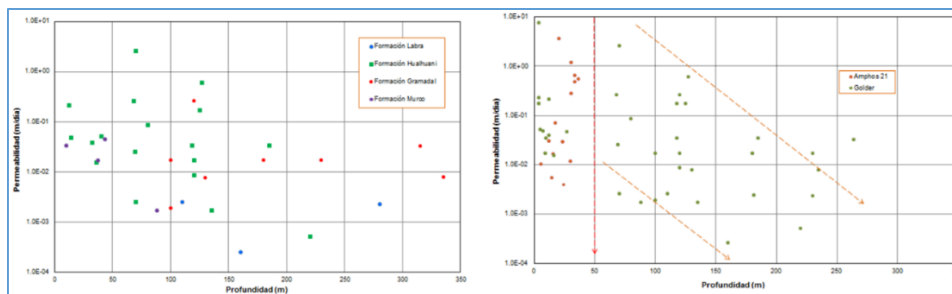
Fuente: INGEMMET, Hidrogeología de la Cuenca Ica, 2010.

## 2.3 Hidroestratigrafía

Luego de haber desarrollado el acople de datos litológicos, geofísicos, estructurales, hidroquímicos e hidráulicos, 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.

## 2.4 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 05, muestra la variación de la conductividad hidráulica en diferentes estratos.

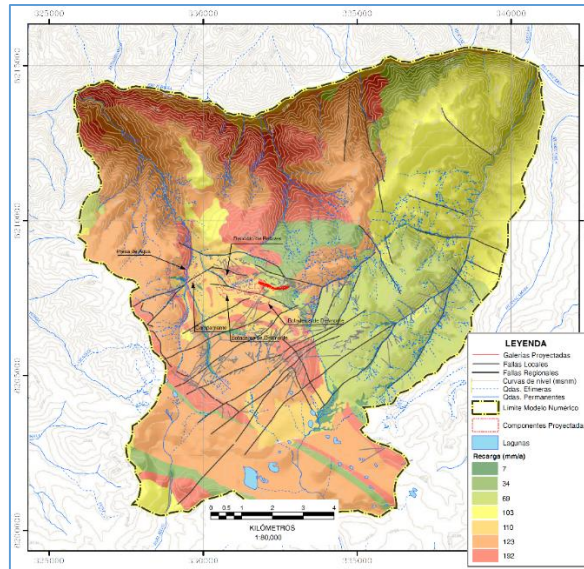


**Figura 05:** Correlación de Parámetros Hidráulicos.

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

## 2.5 Análisis de Recargas

Previo al análisis de la recarga de agua, un estudio hidrológico debe ser desarrollado para evaluar el comportamiento histórico de la precipitación, evapotranspiración, infiltración, flujo base, escurrimiento. De ello y de la caracterización hidro-estratigráfica 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, otros). Existen diversos métodos para estimar la recarga de aguas subterránea desde los balances hidrológicos hasta el método de fluctuaciones del nivel freático; el método elegido debe ser técnicamente sustentado 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 06).

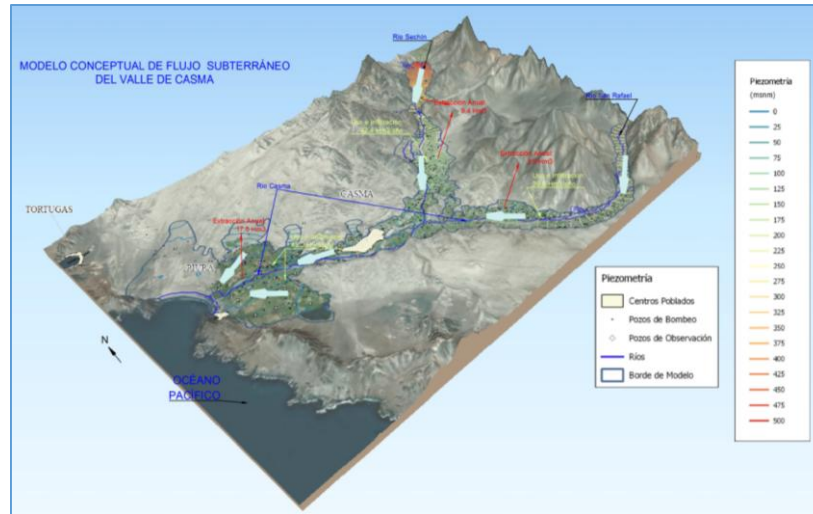


**Figura 06:** Zonificación de recargas

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

## 2.6 Flujo Subterráneo

De acuerdo a los datos observados y 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 07) y la visualización en gráficos y mapas de la presencia y movimiento del flujo.



**Figura 07:** Modelo Conceptual de Flujo Subterráneo, acuífero Casma

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

### 3. Aspectos Mínimos para el modelamiento Conceptual

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

1. **Recopilación de estudios e información básica.** Formaciones geológicas, dirección del flujo, fronteras hidrológicas, parámetros hidráulicos, extracción o inyección de pozos, cargas observadas, etc. Estudios hidrológicos, geológicos-hidrogeológicos, hidroquímica.
2. **Descripción general del sistema de aguas subterráneas.** En base a los estudios e información básica tales como formaciones geológicas, dirección del flujo, fronteras hidrológicas, parámetros hidráulicos, extracción o inyección de pozos, cargas observadas, etc., describir el sistema acuífero bajo estudio. Describir 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 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 son 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 subterránea y flujo base, interacción 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 acorde 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, 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 acorde al marco hidrogeológico (litología, geología). Para cada unidad hidrogeológica establecer un rango de valores basados en las pruebas de bombeo desarrolladas y de 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.

#### 4. El Modelo Numérico

Un modelo matemático o numérico es una representación simplificada de la realidad y frecuentemente usados para simular y predecir el comportamiento del sistema acuífero, los efectos del bombeo sobre los niveles de agua subterránea, estrategias de gestión y sus efectos, etc. El movimiento del agua subterránea (fluido incomprensible) en tres dimensiones para un acuífero anisotrópico, no homogéneo es derivado combinando la Ley de Darcy con la ecuación de continuidad (derivada del principio de conservación de la masa). En general, la ecuación que representa el flujo de agua subterránea a través de un medio poroso, flujo no estacionario a densidad constante, en coordenadas cartesianas, puede ser descrita por la ecuación diferencial parcial siguiente:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_{xx} h \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_{yy} h \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_{zz} h \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S \frac{\partial h}{\partial t} + W$$

Donde  $K_{xx}$ ,  $K_{yy}$ ,  $K_{zz}$  representan la conductividad hidráulica del medio poroso a lo largo de los ejes de coordenadas X, Y, y Z; las mismas que son asumidas ser paralelas a los ejes principales, L/T; h es la carga hidráulica, L; S es el coeficiente de almacenamiento del medio poroso,  $L^{-1}$ ; W es un flujo volumétrico por unidad de volumen, positivo para el flujo de salida y negativo para el flujo de entrada,  $T^{-1}$  y t es el tiempo.  $K_{xx}(x,y,z)$ ,  $K_{yy}(x,y,z)$ ,  $K_{zz}(x,y,z)$  y  $S(x,y,z)$  pueden ser funciones del espacio y  $W(x,y,z,t)$  puede ser una función del espacio y tiempo. La ecuación anterior conjuntamente con las condiciones de frontera de un sistema acuífero y las condiciones iniciales, constituyen la representación matemática de un sistema de flujo de agua subterránea (Harbaugh, 2005; Konikow, 2008). Asimismo, desde que esta es una ecuación diferencial de segundo orden altamente no lineal, una solución aproximada con métodos numéricos, tales como diferencias finitas y elementos finitos, son los más utilizados y recomendados para sistemas complejos. En modelos de flujo transitorio (variación espacial y temporal), la ecuación completa es usada.

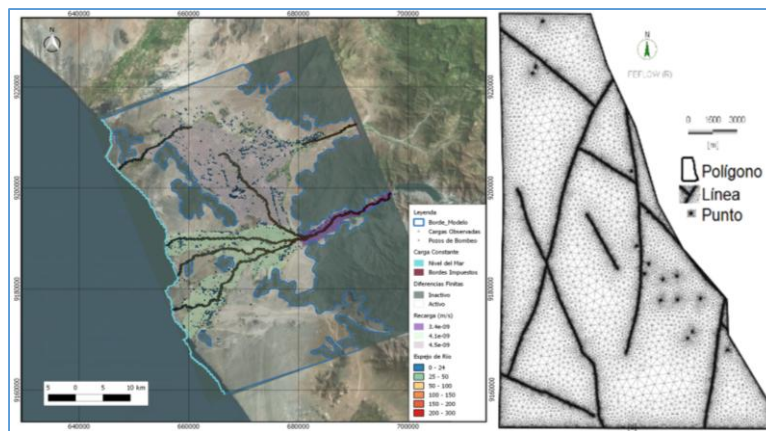
Este documento no intenta describir el procedimiento de los métodos numéricos para resolver la ecuación diferencial parcial antes descrita, desde que el objetivo es proporcionar aspectos técnicos principales para la construcción de modelos numéricos. A continuación se describen las etapas que necesitan ser implementados para diseñar y configurar un modelo numérico del flujo de agua subterránea sobre la base de un software existente:

#### **4.1 Diseño y Selección del Modelo Numérico**

La elección del código de modelización es un proceso que tiene muchos elementos de análisis, como la discrecionalidad del especialista, la complejidad del sistema, la calidad de datos, la representatividad espacial y temporal, y el conocimiento de los métodos. Software o programas computacionales que simulan el flujo de agua subterránea y transporte de masa en medios porosos y medios fracturados y que incluyen los métodos de Diferencias Finitas (FDM, Finite Difference Methods) y Elementos Finitos (FEM, Finite Element Methods) son usados con mayor frecuencia. Por ejemplo, la Autoridad Nacional del Agua, ha desarrollado algunos modelos de flujo de agua subterránea usando MODFLOW y FEFLOW, los mismos que usan metodologías FDM y FEM, para simular acuíferos en valles costeros.

## 4.2 Dominio y Discretización

*La delimitación del dominio computacional* es adaptada acorde al modelo conceptual descrito en la primera parte de este artículo. Esta delimitación servirá, además, para incluir en el análisis numérico elementos condicionantes del flujo subterráneo, como cauces superficiales, manantiales, zonas de extracción, fuentes potencialmente contaminantes, áreas de inyección, estructuras geológicas, límites hidroestratigráficos, lagunas, humedales y otros. *El proceso de Discretización* permite transformar el dominio computacional en una malla de nodos para convertir la ecuación diferencial parcial que describe el flujo en medios porosos, condiciones iniciales y de frontera, en un sistema de ecuaciones algebraicas. Los métodos numéricos más usados para resolver estas ecuaciones diferenciales parciales son los de diferencias finitas (grillas, Figura 08) y elementos finitos (elementos, geometrías irregulares). Para simulaciones en régimen transitorio, una discretización espacial y temporal es necesitada.



**Figura 08:** Dominios Discretizados en FDM y FEM

Fuente: Estudio de Evaluación de Recursos Hídricos de la Cuenca Jequetepeque, 2016.

La discretización deberá delimitar al modelo en función a la distribución espacial (1-D, 2-D o 3-D) y temporal (estacionario, transitorio; segundos, minutos, días, años, otros).

## 4.3 Condiciones de Borde

Las condiciones de frontera constituyen un aspecto clave para la buena representación del sistema de agua subterránea. En general, estas permiten definir las fronteras físicas e hidráulicas del dominio computacional. Cuando desarrollamos simulaciones computacionales del flujo de agua

subterránea numéricamente se evalúa el modelo matemático que representa el flujo del fluido a través del medio poroso (Reilly and Harbaugh, 2004); éste es una ecuación diferencial parcial de segundo orden con carga hidráulica como variable dependiente. Para resolver este problema, condiciones de frontera son necesitadas alrededor del dominio computacional para la carga hidráulica o su gradiente.

Hay tres tipos de condiciones de contorno que comúnmente son establecidas (Wels, 2012; Sinclair Knight Merz, 2012):

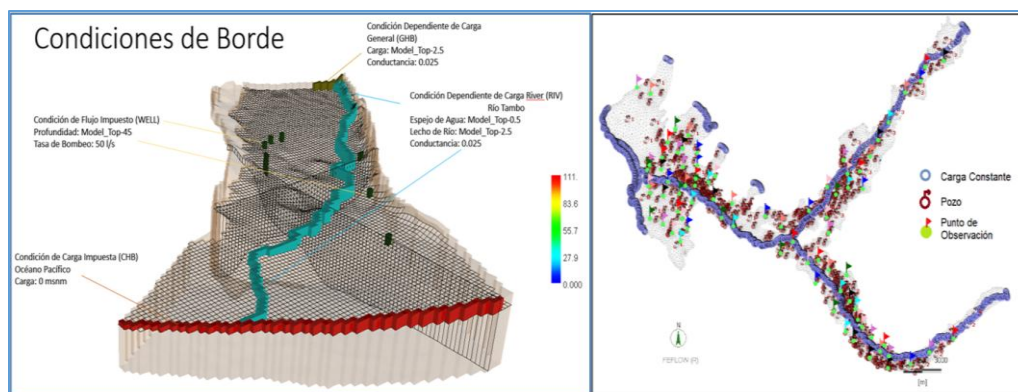
- **Condiciones de frontera con carga especificada (condición de Dirichlet, tipo 1).** En este caso, la carga hidráulica debe ser determinada en la frontera de una celda o nodo como función del tiempo y del espacio. Cuando la carga hidráulica es especificada a lo largo de una sección del dominio computacional, el flujo es calculado. Algunas variaciones de este tipo de condición de borde: a) *Frontera de carga constante (Constant-head boundary)*. Esta condición representa una carga hidráulica invariable con el tiempo y no es afectada por la simulación del sistema de agua subterránea. Debería usarse para representar grandes cuerpos de agua superficial que no son afectados por los intervalos de tiempo (stress) establecidos para el sistema modelado, por ejemplo, grandes ríos, lagos, a una frontera con el mar. Asimismo puede usarse para representar la carga hidráulica observada a lo largo de una división de aguas o un límite arbitrario del dominio computacional, y b) *Frontera de Carga General Especificada (General specified-head boundary)*. Esta condición permite representar una carga hidráulica que podría variar en tiempo y espacio. Por ejemplo, en MODFLOW el paquete “Time-Variant Specified-Head” puede ser usada para simular fronteras de carga especificada que cambian dentro o entre intervalos de tiempo computacional (stress period). Generalmente, la frontera de carga hidráulica especificada es fijada en espacio, sin embargo, puede cambiar en tiempo para modelos transitorios.
- **Condiciones de frontera de gradiente-carga especificado (condición Neumann, tipo 2).** Bajo esta condición, el gradiente de la carga hidráulica es especificado en la frontera lo que significa que el flujo de aguas subterráneas a través de la frontera es especificado como una función del tiempo y el espacio. En MODFLOW, el flujo especificado en las fronteras debe ser configurado con los paquetes de “Flow and Head Boundary”, “Recharge”, “Well”. El paquete de Frontera de Carga y Flujo debe ser utilizado para configurar celdas de carga especificada y celdas de flujo especificado, las mismas que pueden variar dentro de un periodo de tiempo computacional



(stress period). El paquete recarga es usado para simular un flujo especificado distribuido sobre la parte superior del modelo, y es expresado en unidades de longitud /tiempo. En esta condición, el paquete pozos debe ser usado para representar un flujo especificado en celdas individuales (unidades  $L^3/T$ ).

- ***Condiciones de frontera de gradiente y carga hidráulica especificada (Condiciones de Cauchy, tipo 3).*** En esta condición de frontera, tanto la carga hidráulica y su gradiente son especificados. Asimismo, puede ser implementada en forma indirecta, especificando una carga y una conductancia hidráulica; ambas son utilizadas para representar efectos externos al dominio computacional del modelo. Por ejemplo, si usted quiere representar el flujo entre un acuífero y un lago (acuífero subyacente a un lago), para tal fin, el nivel del lago representa la carga hidráulica especificada y la conductancia es la del aquitardo que separa el acuífero del lago (Sinclair Knight Merz, 2012). Otro ejemplo, es la representación de un dren sobre el dominio del modelo. Para ello, usted puede especificar la carga hidráulica de referencia y la conductancia, sin embargo, en las fronteras del dren el agua sólo puede salir del sistema de aguas subterráneas a través de las celdas configuradas. La representación de un río y su interacción con el sistema acuífero, es otro ejemplo interesante de esta condición de frontera. En este caso, primero, debe especificarse la carga hidráulica en el río (tirante en términos de elevación) y la elevación del fondo. Segundo, una conductancia será multiplicada por la diferencia entre la carga en la celda y la carga en el río para determinar el flujo y la interacción respectiva (Niswonger et al. 2011). En MODLOW, esta condición tipo 3, puede ser representada usando los paquetes de “River Package”, “Drain Package”, “Stream Package”, “Evapotranspiration package”, entre otros.

La figura abajo muestra la configuración de algunas condiciones de borde.



**Figura 09:** Ejemplos de Condiciones de Borde

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

#### 4.4 Condiciones Iniciales

En un modelo de flujo, las condiciones iniciales representan las cargas hidráulicas al comienzo de una simulación, las mismas que deben ser definidas por el modelador. Para una simulación en régimen estacionario, las cargas iniciales asumidas podrían afectar la eficacia de la solución numérica y su rapidez si estas no son definidas adecuadamente; sin embargo, la solución final no sería afectada. En general, condiciones iniciales son usadas para simulaciones de flujo en estado transitorio. En este caso, las condiciones iniciales son aquellas a partir de los cuales el modelo calcula los cambios en el sistema debido a los intervalos de tiempo computacional (stress) aplicados (Wels, 2012). En consecuencia, la respuesta del sistema está directamente relacionada con las condiciones iniciales utilizadas en la simulación. Para simulaciones de flujo no estacionario, hay dos métodos comúnmente usados para definir las condiciones iniciales (Reilly and Harbaugh, 2004):

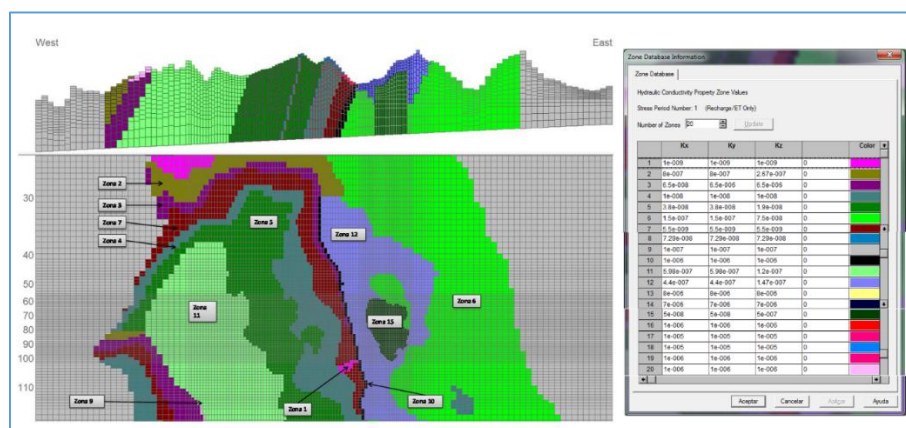
- ✓ Usando los resultados de un modelo de flujo estacionario. Bajo este enfoque se asume que el sistema se encuentra en estado estacionario en algún punto en el tiempo. En la realidad, ésta puede proporcionar una condición útil, estable y cercana a la condición de arranque adecuada para un modelo no estacionario.
- ✓ Usando como condiciones iniciales, los resultados de un modelo no estacionario. Éste método es usado en modelos de simulaciones predictivas, en este caso, las cargas hidráulicas calibradas del modelo son usadas para definir las cargas iniciales del modelo predictivo que simulará, por

ejemplo, los cambios en la carga hidráulica y el flujo base en las corrientes bajo diferentes estrategias de extracción de aguas subterráneas.

#### 4.5 Parámetros del modelo

Los parámetros del modelo incluyen a la conductividad hidráulica, porosidad efectiva, parámetros de almacenamiento; parámetros de transporte de contaminantes tales como la dispersividad, el coeficiente de retardo, tasa de degradación, reacciones químicas difusión. Asimismo, parámetros de tiempo son necesitados para simulaciones del flujo transitorio, incluyen unidades de tiempo, número de pasos de tiempo, longitud y número de periodos (Kresic, 2006; Bear and Cheng, 2010).

Debe evaluarse la variación espacial de las propiedades hidráulicas de los acuíferos y de las capas confinantes y como los valores discretizados han sido calculados a lo largo y ancho del dominio computacional (el reporte debe contener mapas y gráficos, Figura 10). Asimismo, debe señalarse claramente las inferencias hechas de los datos de campo y estudios desarrollados, así como evaluar y describir los valores finales de las propiedades del sistema y si estos fueron cambiados durante el proceso de calibración del modelo.



**Figura 10:** Distribución de la Conductividad Hidráulica

Fuente: Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto Minero La Arena, 2015.

## **4.6 Configuración del modelo**

Después de haber desarrollado el modelo conceptual y seleccionado el código de cómputo acorde a los objetivos del estudio, la configuración del modelo implica, en general, la implementación de fases que a continuación se describen (Kresic, 2006; Bear and Cheng, 2010):

- ✓ Definición del dominio y la geometría del modelo. Definir el dominio computacional usado para el modelamiento, extensión vertical y horizontal del área a ser modelada definida por las fronteras, posición y número de capas, entre otros.
- ✓ Crear un grid o malla para la discretización espacial de cada capa y asimismo crear las capas del modelo.
- ✓ Definir la distribución de los parámetros del modelo de flujo y transporte de masa, de ser el caso; tales como la conductividad hidráulica horizontal y vertical, coeficiente almacenamiento, concentraciones, porosidad, dispersividad y otros, que representen las propiedades hidrogeológicas del sistema en estudio.
- ✓ Definir las condiciones de frontera que influyen en el flujo de agua (y transporte de contaminante de ser el caso), tal como es descrito en la sección previa.
- ✓ Definir las condiciones iniciales. Por ejemplo, la distribución estimada de la carga hidráulica en el dominio computacional y distribución de la concentración de contaminantes cuando ésta es requerida para el modelamiento.
- ✓ Seleccionar los pasos de tiempo, los solucionadores numéricos y criterios de convergencia apropiados. En esta parte, para un modelo de flujo no estacionario, también definir y configurar los intervalos de tiempo computacional (stress) relacionado a las presiones hidráulicas externas e internas, tales como recarga, el bombeo, la evapotranspiración, cambios en el tirante de agua en el río, drenaje, fuente de concentración en los modelos de transporte de contaminantes, etc.

## **4.7 Calibración y Análisis de Sensibilidad**

### **4.7.1 Calibración del Modelo**

La calibración es un proceso mediante el cual los parámetros del modelo, como la conductividad hidráulica, son ajustados hasta que los resultados del mismo concuerden o sean cercanos a valores medidos históricos (observados). Cuando los valores simulados son parecidos a los observados, el modelo puede ser aceptado para representar el sistema físico bajo investigación. Los parámetros frecuentemente usados en la calibración de un modelo de flujo de aguas subterránea son: la

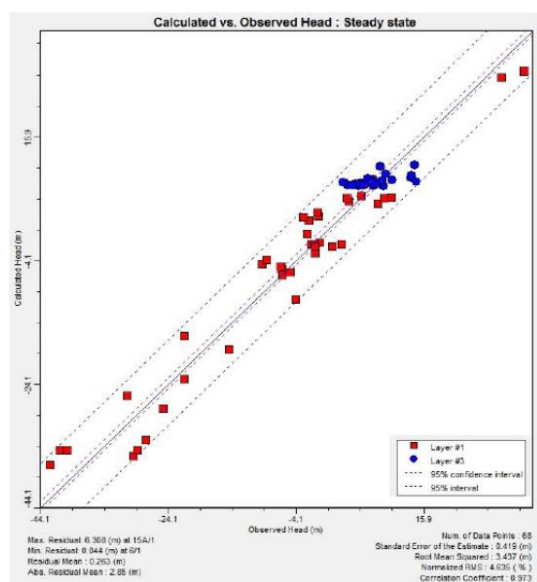
conductividad hidráulica (otras propiedades hidráulicas podría ser consideradas) seleccionada identificando zonas con propiedades hidráulicas similares en base a pruebas de bombeo en acuíferos y configuraciones geológicas, el flujo de recarga estimado en base análisis del balance hídrico, propiedades de suelo, etc., y el flujo de descarga de agua subterránea a la red de drenaje superficial. En general, los datos observados que pueden servir como objetivos de calibración del modelo son: las cargas hidráulicas en diferentes puntos del dominio, flujos de agua subterránea descargando a corrientes (flujo base), arroyos y lagos, la recarga proveniente de la infiltración hacia el nivel freático, pérdidas por filtración en drenes y zanjas, concentración de contaminantes en los modelos de transporte de masa (Wels, 2012, Reilly and Harbaugh, 2004).

La calibración de modelos numéricos en estado no estacionario requiere datos observados con distribución espacial y temporal suficiente, conjuntamente con la buena conceptualización del sistema, permitan obtener parámetros calibrados con significancia física y en consecuencia, un buen desempeño del modelo. El modelador debe ser consciente de las limitaciones y calidad de información existente en muchos sistemas acuíferos, las mismas que deben ser consideradas en la selección de los datos objetivos de calibración. También debe evaluarse las fuentes de error en cada punto de calibración, así como cuantificarlos a fin de establecer el margen de error y dato objetivo. Dependiendo del objetivo de estudio, dos calibraciones podrían ser desarrolladas, una en estado estacionario y otra en estado transitorio. El primer caso, se utiliza para modelar condiciones en equilibrio o condiciones con cambios no significativos en el almacenamiento del acuífero; para ello se debe seleccionar un estado estacionario en algún punto del periodo de análisis y datos objetivos para la calibración con distribución espacial solamente. El segundo caso, se utiliza para modelar problemas dependientes del tiempo y espacio, para simulaciones predictivas donde existan cambios en la carga hidráulica y el flujo subterráneo. En general, para calibrar modelos transitorios la data debe incluir pruebas de bombeo, monitoreo de niveles piezométricos que muestren las variaciones estacionales naturales y artificiales; ésta debería ser representativa y distribuida a lo largo y ancho del dominio computacional (Wels, 2012).

#### **4.7.2 Metodología de calibración**

Existen dos técnica para calibrar un modelo de flujo de agua subterránea. *La calibración manual* (prueba y error) consiste en cambiar manualmente los parámetros de entrada al modelo a fin de mejorar la correlación entre las salidas del modelo y los valores observados. Este método requiere de una inversión de tiempo importante para probar un parámetro o conjunto de parámetros, sin

embargo, proporciona al modelador una amplia visión de los factores que controlan el sistema y de la significancia física de cada parámetro. Por otro lado, *la calibración automática* se fundamenta en el uso de códigos computacionales desarrollados para estimar los parámetros óptimos del modelo. Por ejemplo, la estimación de parámetros con PEST (Model-Independent Parameter Estimation and Uncertainty Analysis), un código de software inverso usado con MODFLOW (Doherty and Randall, 2010); asimismo, muchas interfaces como Groundwater Vistas y Visual MODFLOW incluyen a PEST como herramienta de calibración automática. Ésta técnica de calibración debe ser usada con mucho cuidado, considerando que debe mantenerse en todo momento un modelo conceptual razonable del sistema bajo investigación y parámetros con significancia física. Así mismo, previo al desarrollo de la calibración automática, es recomendable el uso de una calibración manual inicial para establecer rangos de parámetros del modelo que serán variados en la estimación automática. La figura 11 muestra la relación en las cargas calculadas y las observadas, alcanzada a través de una calibración combinada (manual y automática) para un modelo en estado estacionario. Los resultados son comparados utilizando técnicas numéricas y gráficas.



**Figura 11:** Calibración en Régimen Estacionario de Piezometría

Fuente: DCPRH, Estudio de Evaluación de Recursos Hídricos de la Cuenca Piura, 2016.

#### **4.7.3 Evaluación de los resultados de la calibración**

Existen diversos métodos para evaluar los resultados de la calibración y en consecuencia el desempeño del modelo. Para ello, debe establecerse criterios de calibración a través de umbrales estadísticos y algunos requerimientos cualitativos, los mismos que dependerán en gran medida de los objetivos del estudio y la disponibilidad de información. Primero, es necesario una evaluación cualitativa de la distribución espacial de los resultados de la calibración del modelo tales como las propiedades hidráulicas obtenidas en la calibración final, patrones de flujo, patrón de respuesta del sistema acuífero a las variaciones en los hidrogramas de carga hidráulica, etc. Este tipo de evaluación también incluye el uso de gráficos como histogramas, gráficos de frecuencias acumuladas, distribución espacial de los residuos y contornos de las cargas hidráulicas, gráficos de series de tiempo para el modelo transitorio, entre otros (Wels, 2012; Sinclair Knight Merz, 2012).

Segundo, una evaluación cuantitativa usando estadísticas es necesaria para evaluar la bondad del modelo. Para tal efecto, los métodos que como mínimo deben evaluarse son: Error Residual Medio Normalizado, Error Cuadrático Medio de la Raíz, Coeficiente de Correlación. Todo ello permitirá determinar si el modelo desarrollado es robusto y aplicable teniendo en cuenta un modelo conceptual razonable. Si el modelo conceptual no es bien representado, por más ajuste y buena correlación entre los observados y simulados exista, el modelo no será útil para predecir el comportamiento futuro del sistema acuífero.

#### **4.7.4 Análisis de sensibilidad**

La evaluación de los parámetros de entrada y como ellos afectan las salidas del modelo (como las cargas y flujos), se denomina análisis de sensibilidad. Es decir, éste análisis permite probar la fortaleza del modelo a los cambios en los parámetros durante el proceso de calibración. Por ejemplo, en la calibración manual (prueba y error), el análisis de sensibilidad implica cambiar un parámetro del modelo por una cantidad apropiada, volver a ejecutar y establecer cómo las predicciones (cargas y flujos) son afectadas. El objetivo en esta parte debe ser determinar la sensibilidad del modelo a cada parámetro de calibración. Puede usarse gráficos y tabulaciones de series temporales de las cargas hidráulicas y/o flujos de las predicciones del modelo con los respectivos cambios en los valores de los parámetros. En la calibración automática, el proceso radica en un algoritmo de búsqueda que calcula las sensibilidades de una función objetivo a los cambios en todos los parámetros. En este caso, la sensibilidad puede estimarse con PEST u otro software de calibración automática (Wels, 2012; Reilly and Harbaugh, 2004)

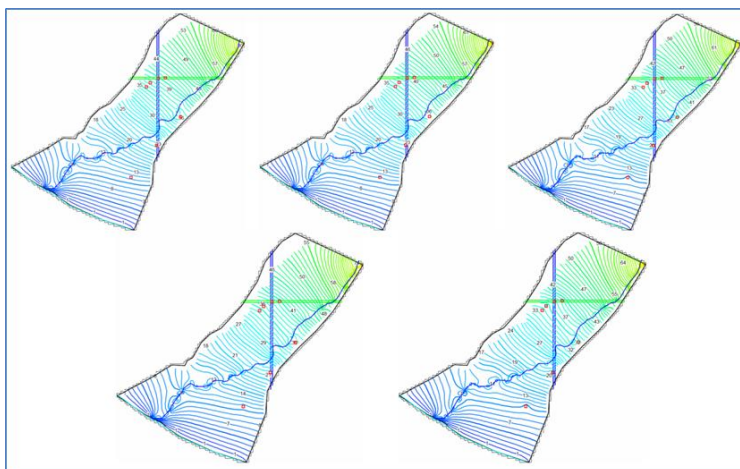
#### **4.7.5 Validación del modelo**

La validación tiene como objetivo confirmar si el modelo calibrado puede ser usado como herramienta predictiva. En esencia, este proceso consiste en comparar las predicciones del modelo calibrado con un periodo de mediciones que está fuera del rango del periodo usado para la calibración del modelo. Con ello puede corroborarse si el modelo predice las diferentes variaciones hidrológicas del sistema bajo investigación.

### **5. Predicción/ escenarios**

Una vez calibrado el modelo que representa razonablemente el comportamiento del sistema, éste puede ser usado para simular escenarios predictivos que ayuden a alcanzar los objetivos del modelamiento. Los modelos predictivos deben tener la capacidad de representar los cambios en la futura extracción de aguas subterránea, la recarga, así como los cambios de las futuras condiciones de borde de ser necesarias; por tanto, estas podrían variar en relación al modelo calibrado. Las predicciones pueden obtenerse en estado estacionario o transitorio indistintamente del periodo de tiempo elegido para la calibración. En general, el modelo de flujo de agua subterránea predice las cargas hidráulicas y los modelos de transporte de soluto predicen las concentraciones en todos los nodos dentro de la malla del dominio computacional. Los flujos de agua son calculados entre los nodos del modelo y las condiciones de frontera previamente definidas. En modelos estacionarios, variación espacial solamente, los cálculos se obtienen para un solo conjunto de cargas o concentraciones de contaminantes relacionadas a condiciones de equilibrio. Para modelos transitorios (variación espacial y temporal), estas variables se calculan en todos los nodos del dominio en función del tiempo y proporcionan como resultado una serie temporal (Sinclair Knight Merz, 2012). Otro resultado importante de las predicciones, es el balance de masa del modelo en cada periodo de tiempo e incluye la suma de todos los flujos dentro y fuera del modelo. El cambio en el almacenamiento es calculado por el principio de conservación de la masa. La Figura 12 muestra un ejemplo de variación piezométrica bajo diferentes escenarios de extracción.





**Figura 12:** Variación de Piezometría bajo escenarios de extracción - Valle del Río Tambo

Fuente: Zonificación de áreas favorables para la explotación en el Valle Tambo, 2016.

## 6. Análisis de Incertidumbre

La incertidumbre es lo que no conocemos sobre un sistema. En modelos de agua subterránea, las fuentes de incertidumbre incluyen a los parámetros del modelo e incertidumbre debido a errores en las mediciones, modelo conceptual, la calibración del modelo. La falta de conocimiento de los parámetros de entrada tales como la conductividad hidráulica, recarga, tasas de bombeo, geometría del acuífero, etc., es una fuente importante de incertidumbre en el modelamiento de agua subterránea. Por otro lado, la incertidumbre en el modelo conceptual del sistema bajo estudio se debe esencialmente a las simplificaciones conceptuales en espacio y tiempo desarrolladas durante el proceso de modelamiento y calibración.

En consecuencia, el modelamiento del flujo de agua subterránea debe abordar el tema de análisis de incertidumbre. Evaluar el impacto de la incertidumbre de los valores del parámetro sobre los escenarios o predicciones.

## 7. Aspectos Mínimos para el Modelamiento Numérico

En resumen el modelo numérico debe abordar mínimamente los siguientes aspectos (Reilly and Harbaugh, 2004; Wels, 2012):

1. **Descripción y dominio del modelo.** Describir el modelo y el procedimiento utilizado. Asimismo describir el dominio computacional usado para el modelamiento y si cubre apropiadamente la zona bajo investigación.

2. **Discretización del modelo** (*Diferencias Finitas o Elementos Finitos*). Describir y evaluar el espaciamiento y distribución de las celdas, elementos o regiones que deben reflejar la variación espacial de los parámetros hidráulicos y la localización de fronteras como ríos, lagos, pozos, diques, etc. Además, evaluar y mostrar la discretización vertical. Describir y evaluar como el tiempo (paso de tiempo) es discretizado para el modelo de flujo transitorio. Asimismo, evaluar los errores que podrían ser introducidos en el resultado del estudio si un modelo en estado estacionario es utilizado para simular una condición estacionaria aproximada. El dominio discretizado debe ser mostrado en un mapa.
3. **Condiciones de Frontera**. Describir y evaluar las características hidrogeológicas de las condiciones de frontera utilizadas en la modelación del sistema. En muchos casos el acuífero podría ser tan extenso en relación al área de interés, de manera que el área modelada podría necesitar ser truncada arbitrariamente. En este caso, debe mostrarse que dicha selección de condición de borde (carga hidráulica, por ejemplo) no afecta el desempeño del modelo para simular el sistema acorde a los objetivos del estudio. Por otro lado, debe describirse y evaluarse la representación en el modelo de las condiciones de frontera interna tales como lagos, drenes, corrientes, afloramientos de zonas hidrogeológicas, etc. y como concuerdan con el modelo conceptual. En el estudio debe existir un claro argumento de las condiciones de frontera configuradas en el modelo numérico para representar en forma apropiada el sistema actual.
4. **Propiedades del sistema acuífero**. En esta parte describir las propiedades del sistema acuífero que son configuradas y modeladas en MODFLOW u otra plataforma computacional. Evaluar la variación espacial de las propiedades hidráulicas de los acuíferos y de las capas confinantes y como los valores discretizados han sido calculados a lo largo y ancho del dominio computacional (el reporte debe contener mapas y gráficos). Evaluar las inferencias hechas de los datos de campo y estudios desarrollados. Describir los valores finales de las propiedades del sistema si estos fueron cambiados durante el proceso de calibración del modelo.
5. **Intervalos de tiempo** (*Stress Period*). Stress periods son aquellos intervalos de tiempo computacional que son requeridos para una simulación MODFLOW. En un modelo no estacionario, describir y evaluar los intervalos de tiempo modelados tales como la recarga que viene de la infiltración, el bombeo, la evapotranspiración, cambios en el tirante de agua

en el río, fuente de concentración en los modelos de transporte de contaminantes, etc. Evaluar como los intervalos de tiempo son promediados dentro del dominio espacial y el tiempo discretizado. Es decir la relación entre el modelado y observado “stress period” debe ser descrito. Para un modelo de flujo estacionario, evaluar y describir el intervalo de tiempo promedio usado para representar el sistema.

6. **Condiciones iniciales.** En un modelo de flujo transitorio, evaluar y describir las condiciones iniciales que son usadas para las simulaciones. Dos casos pueden presentarse:
  - a) Condiciones iniciales generadas por una simulación en estado estacionario usando el mismo modelo. En este caso, los parámetros hidráulicos usados en estado transitorio deben ser los mismos que aquellos usados en la simulación en estado estacionario.
  - b) Condiciones iniciales no generadas de una condición estacionaria. Para este caso evaluar y describir las condiciones derivadas, las limitaciones de los valores estimados y los potenciales impactos en los resultados del modelo.
7. **Calibración del modelo y análisis de sensibilidad.** En esta parte evaluar el criterio de calibración (calibrada conductividad hidráulica o calibrada recarga, por ejemplo), el procedimiento y los resultados. Evaluar si los parámetros calibrados tienen significancia física considerando el modelo conceptual construido en la etapa previa. Evaluar los datos observados utilizados para comparar los resultados del modelo. Evaluar las cargas hidráulicas simuladas con las observadas en la red de pozos seleccionada. El estudio debe mostrar comparaciones reales y ubicaciones de puntos en mapas, etc. Para un modelo estacionario, evaluar de qué manera los datos observados utilizados cumple con esa condición aproximada. Determinar si el modelo calibrado para el sistema de agua subterránea puede ser usado para representar el pasado, el presente y predecir el futuro. El análisis de sensibilidad es parte de la calibración del modelo. La evaluación de los parámetros de entrada al modelo y como ellos afectan las salidas del mismo (como las cargas y flujos), se denomina análisis de sensibilidad. Evaluar la sensibilidad de la respuesta del modelo a los cambios en los valores del parámetro, como la conductividad hidráulica, es muy importante para entender la amplitud del comportamiento del sistema.
8. **Análisis incertidumbre.** En un modelo determinístico, un conjunto fijo de parámetros y condiciones de contorno, generalmente de un modelo calibrado son obtenidos. Cuando se

desarrollan proyecciones, se cambia simplemente los intervalos de tiempo (stress) en el modelo para simular lo que pasaría con el sistema de aguas subterráneas en el futuro. No obstante que este enfoque aún es aceptado, no aborda realmente el problema de incertidumbre debido al modelo conceptual, datos observados, condiciones de frontera, y los parámetros del modelo ni como ellos afectarían las predicciones. Por tanto, todo modelamiento del flujo de agua subterránea debe abordar el tema de análisis de incertidumbre. Evaluar el impacto de la incertidumbre de los valores del parámetro sobre los escenarios o proyecciones.

### **9. *Predicción y Escenarios***

Evaluar los resultados del modelo en estado estacionario y no estacionario, las cargas hidráulicas y recargas. Evaluar si los escenarios simulados cumplen los objetivos del estudio y si ellos son razonablemente posibles. Evaluar si el modelo predictivo tiene la capacidad para representar los cambios futuros del sistema acuífero.

## **8. Conclusiones**

Dada la creciente demanda por el agua subterránea en muchas regiones del país surge la necesidad de generar información, establecer políticas y estrategias de gestión de los acuíferos que garanticen su sostenibilidad. Además, considerando que la dinámica del flujo subterráneo es compleja, modelos computacionales para simular y predecir su respuesta son requeridos. Para tal efecto, un conjunto de aspectos en forma sistemática necesitan ser establecidos para desarrollar y evaluar un modelo conceptual y numérico.

El modelo conceptual es la parte inicial y más importante del proceso de modelamiento para tener una 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 como su geometría, interconexión, geomorfología; el balance hídrico preliminar (recargas y descargas); 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, etc.

Por otro lado, el modelo numérico involucra la selección del método numérico para resolver las ecuaciones diferenciales parciales, o software de modelamiento, la dimensión del dominio

computacional, la discretización espacial y temporal, la configuración de parámetros, las condiciones de borde y condiciones iniciales. La calibración y análisis de sensibilidad, la predicción y escenarios y el análisis de incertidumbre son fases esenciales y complementarias al modelamiento numérico.

## **Referencias:**

Autoridad Nacional del Agua (ANA). (2016). “Estudios de Evaluación de Recursos Hídricos de las Cuencas de los ríos Casma, Jequetepeque, Piura”, Dirección de Conservación de Recursos Hídricos (DCPRH).

Bear, J; Cheng, A. (2010). “Modeling Groundwater Flow and Contaminant Transport”. Springer.

Charbeneau, R.J. (2000). “Groundwater Hydraulics and Pollutant Transport”, Prentice Hall.

Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto Minero San Gabriel. (2016). Amphos 21, SEIA, DGCRH-DCPRH-ANA.

Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto Minero La Arena. (2015). Montgomery Associates, SEIA, DGCRH-DCPRH-ANA.

Doherty, John E., and Hunt Randall J. (2010). “Approaches to Highly Parameterized Inversion: A Guide to Using PEST for Groundwater-Model Calibration”. Scientific Investigations Report 2010–5169. U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey.

Harbaugh, Arlen W. (2005). “MODFLOW-2005, The U.S. Geological Survey modular groundwater model—the Ground-Water Flow Process”, U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-A16, variously p.

Kresic, Neven. (2006). “Hydrogeology and Groundwater Modeling”, CRC Press; Second Edition.

Howard S. Wheeler, Simon A. Mathias, Xin Li. (2010). “Groundwater Modelling in Arid and Semi-Arid Areas”. Cambridge University Press.

Herbert F. Wang, H., and Anderson, M.P. (1995). “Introduction to Groundwater Modeling: Finite Difference and Finite Element Methods”, Academic Press.

Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET). (2010). “Hidrogeología de la Cuenca Ica”.

Fetter, C.W. (2008). “Contaminant Hydrogeology”, 2nd ed., Prentice Hall.

Konikow, L.F. (2008). “Use of Numerical Models to Simulate Groundwater Flow and Transport”. US, Geological Survey, Reston, Virginia, USA.

Niswonger, Richard G., Panday, Sorab., and Ibaraki, Motomu. (2011). MODFLOW-NWT, A Newton Formulation for MODFLOW-2005, U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey.

Reilly, T.E y Harbaugh, A.W. (2004). “Guidelines for Evaluating Ground-Water Flow Models”, U.S. Geological Survey (USGS), US.

Sinclair Knight Merz and National Centre for Groundwater Research and Training. (2012). “Australian Groundwater Modelling Guidelines”. Waterlines Report Series No. 82.

Todd, D.K., and Larry W. Mays. (2005). “Groundwater Hydrology”, 3rd ed., Wiley, New York.

Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA). (2016). “Instrumentos de Gestión Ambiental de Sectores Mineros y Energéticos”.

Wels, Christoph. (2012). Guidelines for Groundwater Modelling to Assess Impacts of Proposed Natural Resource Development Activities, British Columbia, Ministry of Environment.

Zonificación de áreas favorables para la explotación en el Valle Tambo. (2016). DEPHM, ANA.