

# Marco Geológico para Modelos de Flujo de Agua Subterránea

J.P. Brandenburg  
Traducción de Pabla Tognoli



THE  
GROUNDWATER  
PROJECT

# *Marco Geológico para Modelos de Flujo de Agua Subterránea*

*The Groundwater Project*

*J.P. Brandenburg*

*Geólogo Senior  
Haley & Aldrich, Incorporated  
Ann Arbor, Michigan, Estados Unidos*

*Traducción: Pabla Tognoli  
Geóloga, Departamento General de Irrigación  
Mendoza, Argentina*

*Marco Geológico para Modelos de  
Flujo de Agua Subterránea*

*The Groundwater Project  
Guelph, Ontario, Canada*

Todos los derechos están reservados. Esta publicación está protegida por derechos de “copyright”. Ninguna parte de este libro puede reproducirse de ninguna forma ni por ningún medio. No se puede reproducir ninguna parte de este libro ni en cualquier forma ni medio sin la autorización por escrito de los autores (para solicitar autorización, póngase en contacto con: [permissions@gw-project.org](mailto:permissions@gw-project.org)). La distribución y reproducción comercial están estrictamente prohibidas.

Los trabajos del GW-Project pueden ser descargados de forma gratuita desde [gw-project.org](http://gw-project.org). Cualquiera puede usar y compartir los enlaces de [gw-project.org](http://gw-project.org) para la descarga de los trabajos del GW-Project. No está permitido hacer que los documentos del GW-Project estén disponibles en otros sitios web ni enviar copias de los documentos directamente a otros.

Copyright © 2020 J.P. Brandenburg (El autor)

Publicado por The Groundwater Project, Guelph, Ontario, Canada, 2020.

Brandenburg, J.P.

Geologic Frameworks for Groundwater Flow Models/ J.P. Brandenburg - Guelph, Ontario, Canada, 2020.

25 pages.

ISBN: 978-1-7770541-9-9

DOI: <https://doi.org/10.21083/978-1-7770541-9-9>.

Traducción por Pabla Tognoli, 2021

29 páginas

ISBN: 978-1-77470-072-3

Por favor, considere suscribirse a la lista de correo del GW-Project y mantenerse informado acerca de los nuevos lanzamientos de libros, eventos y formas de participar en el Proyecto. Cuando Ud. se suscribe en nuestro listado de correo electrónico nos está ayudando a construir una comunidad global de aguas subterráneas. [Registrarse](#).

Cita: Brandenburg, J.P., 2020, [Geologic Frameworks for Groundwater Flow Models](#). The Groundwater Project, Guelph, Ontario, Canada,



*Editores de Dominio:* John Cherry y Eileen Poeter

*Consejo:* John Cherry, Paul Hsieh, Ineke Kalwij, Stephen Moran, Everton de Oliveira y Eileen Poeter

*Comité Directivo:* John Cherry, Allan Freeze, Paul Hsieh, Ineke Kalwij, Douglas Mackay, Stephen Moran, Everton de Oliveira, Beth Parker, Eileen Poeter, Ying Fan, Warren Wood, y Yan Zheng.

*Diseño de Tapa:* J.P. Brandenburg, 2020

*Traducción al español:* Pabla Tognoli, 2021.

# Tabla de Contenido

<b>FLUJO DE AGUA SUBTERRÁNEA</b> .....	<b>I</b>
<b>TABLA DE CONTENIDO</b> .....	<b>IV</b>
<b>INTRODUCCIÓN A THE GROUNDWATER PROJECT</b> .....	<b>VI</b>
<b>PRÓLOGO DEL EDITOR</b> .....	<b>VII</b>
<b>PRÓLOGO PARA LA VERSIÓN EN ESPAÑOL</b> .....	<b>VIII</b>
<b>PRÓLOGO</b> .....	<b>IX</b>
<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	<b>X</b>
<b>AGRADECIMIENTOS DEL TRADUCTOR</b> .....	<b>XI</b>
<b>1 DESCRIPCIÓN GENERAL</b> .....	<b>1</b>
<b>2 INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>2</b>
<b>3 CONTEXTO Y PROPÓSITO</b> .....	<b>4</b>
3.1 MODELOS CONCEPTUALES .....	4
3.2 GEOLOGÍA LOCAL .....	4
3.3 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL .....	4
3.4 ESTRATIGRAFÍA .....	5
<b>4 CONSTRUCCIÓN DEL MARCO DE REFERENCIA</b> .....	<b>6</b>
4.1 MAPAS Y SECCIONES TRANSVERSALES .....	6
4.2 SUPERFICIES .....	6
4.3 GRILLADO .....	9
<b>5 CÁLCULO DE PROPIEDADES</b> .....	<b>12</b>
5.1 ESPESOR BRUTO.....	12
5.2 ESPESOR NETO.....	13
5.3 RELACIÓN ESPESOR NETO A BRUTO .....	14
5.4 PROPIEDADES .....	14
<b>6 EL MODELO</b> .....	<b>16</b>
<b>7 CREACIÓN DE UN MODELO ESTÁTICO A PARTIR DEL MAPEO DE FACIES</b> .....	<b>17</b>
<b>8 CREACIÓN DE UN MODELO ESTÁTICO A PARTIR DE PROPIEDADES ESCALADAS</b> .....	<b>18</b>
<b>9 CREACIÓN DE UN MODELO ESTÁTICO A PARTIR DE DATOS LITOLÓGICOS</b> .....	<b>20</b>
<b>10 RESUMEN</b> .....	<b>21</b>
<b>11 REFERENCIAS</b> .....	<b>22</b>
<b>12 EJERCICIOS</b> .....	<b>23</b>
EJERCICIO 1 .....	23
EJERCICIO 2 .....	23
EJERCICIO 3 .....	23
<b>13 CUADROS</b> .....	<b>24</b>
CUADRO 1 - GRILLADO CON DATOS DISPERSOS.....	24
<b>14 SOLUCIONES DE LOS EJERCICIOS</b> .....	<b>26</b>
EJERCICIO 1 – SOLUCIÓN.....	26
EJERCICIO 2 – SOLUCIÓN.....	26
EJERCICIO 3 – SOLUCIÓN.....	26
<b>15 ACERCA DEL AUTOR</b> .....	<b>27</b>

<b>16 ACERCA DEL TRADUCTOR .....</b>	<b>28</b>
<b>MODIFICACIONES A LA VERSIÓN ORIGINAL.....</b>	<b>A</b>

## Introducción A The Groundwater Project

Con algunos años de anticipación, los Miembros y Socios del Agua de las Naciones Unidas establecen su tema anual. El tema elegido para el Día Mundial del Agua del 22 de marzo de 2022 es "Aguas subterráneas: hacer visible lo invisible". Por esto, se considera que el 2020 es el momento más apropiado para la aparición de los primeros libros de The Groundwater Project, los cuales tienen como objetivo hacer visible el agua subterránea.

El GW-Project, una organización sin fines de lucro registrada en Canadá en 2019, está comprometida a contribuir al avance en la educación y brinda un nuevo enfoque a la creación y difusión de conocimiento para el entendimiento y resolución de problemas. El GW-Project opera el sitio web <https://gw-project.org> como una plataforma global para la democratización del conocimiento de las aguas subterráneas y está basado en el principio que sigue:

*"El conocimiento debe ser gratuito y el mejor conocimiento debe ser conocimiento gratuito".  
Anónimo.*

La misión del GW-Project es proveer material educativo accesible, comprometido, de alta calidad, gratuito, en línea en muchos idiomas, para que todo aquel que quiera aprender acerca del agua subterránea y entender cómo el agua subterránea se relaciona con y sustenta a los sistemas ecológicos y la humanidad. Este es un nuevo tipo de esfuerzo educativo global ya que se basa en el voluntariado de profesionales de diferentes disciplinas incluyendo académicos, consultores y jubilados. El GW-Project involucra varios cientos de voluntarios asociados a más de 200 organizaciones en 14 países y seis continentes con una participación en crecimiento.

El GW-Project representa un esfuerzo continuo y por tanto continuará publicando cientos de libros en los próximos años, primero en inglés y luego en otros idiomas, para descarga desde donde sea que la Internet esté disponible. Las publicaciones del GW-Project también incluyen material de apoyo como videos, conferencias, demostraciones de laboratorio, y herramientas de aprendizaje, además de proporcionar, o vincular enlaces de software, de dominio público, de diversas aplicaciones de aguas subterráneas que apoyan el proceso educativo.

El GW-Project es una entidad viva, por lo tanto las subsecuentes ediciones de libros serán publicadas de tiempo a tiempo. Los usuarios están invitados a proponer revisiones.

Agradecemos que seas parte de la Comunidad del GW-Project. Esperamos que nos cuentes tu experiencia con el uso de los libros y del material relacionado. ¡Damos la bienvenida a ideas y voluntarios!

Comité Directivo del The GW-Project

Noviembre 2020

## Prólogo del Editor

La hidrología aplicada requiere el uso de modelos conceptuales para representar las condiciones del flujo del agua subterránea. Esto es clave para resolver problemas de desarrollo y contaminación de la misma. El entendimiento de las condiciones del agua subterránea comienza con el entendimiento de la geología y el uso de la información geológica para estimar la conductividad hidráulica y la porosidad. Posteriormente, la distribución de la conductividad hidráulica y la porosidad inferidas a partir de información geológica son usadas para crear representaciones hidrogeológicas del sistema de flujo del agua subterránea. Antes de los años 70 esta conversión se hacía con lápiz y papel pero ahora se realiza usando software de fácil acceso. Sin embargo, para usar el software efectivamente es esencial entender los procesos de conversión que conlleva. Este libro: Marco Geológico para Modelos de Flujo de Agua Subterránea escrito por J.P. Brandenburg es una introducción a esos procesos de conversión, instalados muy bien en la industria petrolera pero que han quedado rezagados en la hidrogeología. Los hidrogeólogos saben que los modelos de flujo tridimensionales son esenciales, pero la conversión desde datos geológicos a modelos hidrogeológicos necesita un reconocimiento más claro. Esta conversión se conoce como: 'modelado estático', el cual es el precursor del 'modelado dinámico'. El modelado dinámico se refiere al modelado del flujo y transporte (por ejemplo, los acuíferos no se mueven por lo tanto son estáticos, pero los fluidos están en movimiento, entonces son dinámicos).

J.P. Brandenburg, el autor de este libro, está excepcionalmente calificado para la tarea porque está extensamente educado tanto en geología como en el flujo de fluidos; ha llevado a cabo conversiones para sofisticados modelos estáticos y dinámicos en la industria del petróleo; y actualmente está enfocado en conversiones para complejos modelos tridimensionales de agua subterránea.

John Cherry, Líder del The Groundwater Project  
Guelph, Ontario, Canada, Noviembre 2020

## Prólogo para la versión en español

Como hidrogeóloga, a partir de la aparición de las publicaciones del GW-Project me he sentido muy acompañada en la tarea de divulgar información relacionada al agua subterránea y a la gestión de los recursos hídricos. He usado los libros del proyecto, escritos por grandes expertos, tanto para explicar cosas complejas de manera sencilla como también para entender temas complejos que no están dentro de mi área de trabajo cotidiano. Por esta razón, me vi motivada a participar como voluntaria en la traducción de los libros del GW-Project y así colaborar en la difusión de contenido de calidad sobre el agua subterránea, superando las barreras del lenguaje y llegando a todas las personas interesadas en aprender sobre este recurso invisible.

El libro de J.P.Brandenburg nos introduce a una de las tareas más importantes que debemos afrontar los hidrogeólogos cuando debemos predecir el comportamiento del agua subterránea en un sistema acuífero. En este libro, el autor nos presenta un esquema de trabajo sistemático que permite construir un modelo de flujo de agua subterránea lo más realista posible. Lo hace a través de un ejemplo hipotético de un sitio contaminado, guiándonos desde las etapas de recolección de datos e interpretación geológica, hasta la conversión del modelo conceptual y la geología de subsuelo en una representación numérica (modelo estático). En segundo término nos enseña la manera de convertir el modelo estático en un modelo numérico de flujo de agua subterránea (modelo dinámico) que permitirá entender el movimiento del agua en los acuíferos. Incluye datos y links a los softwares gratuitos más comúnmente usados en esta tarea, pero también nos invita a comenzar la tarea con lápiz y papel y siempre tener nuestra mirada crítica sobre los resultados obtenidos mediante un software.

Espero que disfruten de este libro en su versión español.

¡Bienvenidos al maravilloso mundo del agua subterránea!

## Prólogo

Los modeladores del agua subterránea deben estar familiarizados y tener acceso a métodos sistemáticos para traducir la geología física de subsuelo en representaciones numéricas. Por otra parte, los hidrogeólogos se benefician del entendimiento del proceso. Este libro introduce técnicas para crear el marco geológico subyacente de los modelos de flujo de agua subterránea. Está organizado tomando como caso de estudio un sitio hipotético con agua subterránea contaminada, comienza con una discusión sobre la recolección de datos e interpretación geológica, y luego profundiza en los pasos requeridos para construir un modelo numérico realista. El lector encontrará que muchos de los métodos y cálculos pueden ser aplicados con sencillas herramientas como lápiz y papel. Cuando es posible, se proporcionan links para acceder a recursos informáticos públicos disponibles.

## Agradecimientos

Agradezco a las siguientes personas por sus exhaustivas y útiles revisiones y contribuciones a este libro:

- ❖ John G. Solum, Shell International Exploration and Production;
- ❖ Steve Naruk, Profesor Adjunto, Departamento de Ciencias de la Tierra y Atmósfera, Universidad de Houston; y,
- ❖ Murray Einarson, Técnico Experto, Haley & Aldrich, Inc.

Son muy apreciadas las sugerencias y contribuciones de Eileen Poeter. Agradezco la supervisión de Amanda Sills y la corrección de estilo de Elhana Dyck, ambas de The Groundwater Project, de Guelph, Ontario, Canadá. Agradezco a Eileen Poeter (Colorado School of Mines, Golden, Colorado, USA) por la corrección de estilo, edición de diseño y producción de este libro. La figura de tapa fue generada usando el software Visual MODFLOW Flex de Waterloo Hydrogeologic.

## Agradecimientos del traductor

Agradezco la orientación y contribuciones de Everton de Oliveira, Leticia Bentes y María Puccetti de The Groundwater Project, São Paulo, Brasil, para impulsar este libro hasta su finalización. También los aportes de Amanda Sills para arribar a la edición final. Agradezco a Martina Capalbo por su ayuda en la edición de las figuras.

# 1 Descripción General

Antes de simular el flujo del agua subterránea es necesario contar con un modelo de la geología de subsuelo. Se sabe que la industria petrolera ha tenido procedimientos mejor definidos para el modelado geológico que la industria de las aguas subterráneas. Por consiguiente, The Groundwater Project proporciona este libro para revisar el proceso básico de modelado del subsuelo, incluyendo técnicas tanto desde la perspectiva del agua subterránea como del petróleo. Dados los intereses comerciales de la industria del petróleo, la atención se centra en simular con precisión el volumen, el flujo y la extracción de fluidos del subsuelo. Las técnicas descritas en este libro, particularmente los conceptos de *espesor neto* (el espesor del estrato de tamaño de grano más grueso que sustenta el flujo del fluido) versus *espesor bruto* (espesor vertical total entre unidades limitantes), no solo son importantes para la producción de petróleo, sino también son relevantes para simular los flujos del agua subterránea, los cuales pueden ser de interés para los modeladores de recursos hídricos que están estimando el volumen de almacenamiento en los acuíferos.

Los modelos numéricos construidos para simular el destino y el transporte de los contaminantes requieren una delimitación más detallada de la geología. Para estas aplicaciones, se requiere conocer la distribución de propiedades geológicas heterogéneas porque los contaminantes siguen caminos preferenciales a través de zonas conectadas de alta conductividad hidráulica, y muchos procesos de destino y transporte dependen del intercambio de fluidos químicamente diferentes entre zonas de diferente conductividad hidráulica.

Las técnicas de modelado presentadas aquí son aplicables únicamente a los acuíferos clásticos, compuestos de sedimentos o rocas sedimentarias derivadas de la meteorización mecánica, básicamente formados por alguna combinación de grava, arena, limo y arcilla. Estos pueden ser inconsolidados (friables, con granos sueltos sin cementar) o consolidados (fuertemente compactados, con granos cementados). Estas técnicas no se aplican a rocas fracturadas, karst u otros acuíferos donde la porosidad secundaria es la vía de flujo dominante.

El software de agua subterránea [Visual MODFLOW FLEX](#) de Waterloo Hydrogeologic es el que se usa en este libro. Es un programa informático que hace más fácil el modelado del flujo del agua subterránea a través de la herramienta de simulación de flujo usada más comúnmente: el [código MODFLOW](#) del USGS. Tiene también la ventaja de compartir algunos antecesores con el software Petrel de Schlumberger, un estándar de la industria del petróleo y gas para el modelado geológico del subsuelo. El software de modelación geológica [RockWorks](#) también se usa en este libro. Este último se utiliza para generar una distribución de materiales geológicos a los cuales se puede asignar propiedades hidráulicas las cuales se convierten luego a valores para generar una grilla de modelado de agua subterránea como la requerida por MODFLOW.

## 2 Introducción

<Los hidrogeólogos trabajan con otros geólogos e ingenieros para desarrollar un marco que provea las bases para definir las propiedades del modelo de flujo de agua subterránea en un proceso de dos etapas o pasos; un modelo estático seguido por un modelo de flujo dinámico. Las propiedades invariables de la geología se caracterizan en un modelo estático, mientras que el modelo dinámico simula el flujo y ajusta las propiedades hidráulicas si es que estas se alteran a partir de cambios en el sistema de flujo.

Por ejemplo, la presión decreciente durante la extracción de fluidos hace que los materiales geológicos se compactan, reduciendo la conductividad hidráulica y la porosidad (propiedades dinámicas). Entretanto, la cantidad de arena relativa al contenido de arcilla en el reservorio permanece invariable (propiedad estática), Un modelo estático está construido usando herramientas geométricas y se usa para rellenar o poblar un simulador de flujo con propiedades hidráulicas. Un modelo dinámico está construido usando un simulador de flujo (el usado comúnmente para el agua subterránea es MODFLOW) y se utiliza para ajustar las propiedades hidráulicas haciéndolas coincidir con la simulación con los datos medidos en el campo, de modo que el simulador predecirá razonablemente los cambios en el sistema de flujo en respuesta a presiones. Tradicionalmente, el modelo estático estaba desarrollado por geólogos y luego entregado a los ingenieros para la simulación dinámica. Sin embargo, la experiencia ha demostrado que este proceso unidireccional tiene algunas limitaciones, ya que la calibración del modelo dinámico puede proporcionar información adicional sobre la geología, y la comprensión de la geología puede limitar los parámetros necesarios para la calibración. Hoy en día, el proceso tiende que ser más iterativo. En la industria del agua subterránea, el modelador suele ser experto en matemáticas, ingeniería y geología, o un grupo de expertos trabajando juntos para desarrollar el modelo.

La construcción de modelos de agua subterránea tiende a ser un proceso intensivo espacialmente con atención a los detalles de visualización de mapas y la simplificación del subsuelo en una serie de acuíferos o unidades hidroestratigráficas de flujo. Este es sin duda el enfoque más apropiado para el modelado a escala regional o de cuenca hidrográfica, y hay muchas herramientas SIG sofisticadas disponibles para tal trabajo. Sin embargo, estas herramientas y métodos pueden resultar engorrosos cuando se trata de modelos a escala local, que pueden tener un área de sólo unos pocos miles o cientos de metros cuadrados.

Este libro se centra en la construcción de modelos de agua subterránea a escala de sitio contaminado, utilizando una secuencia de trabajo semejante al empleado para el modelado estático de yacimientos de petróleo. No se recomienda ningún software en particular ya que una gran parte del trabajo se puede hacer con papel y lápiz o con algún software genérico de creación de contornos. Muchos de los conceptos centrales son anteriores a las computadoras modernas con gran capacidad gráfica y no han cambiado con los mejores softwares.

La secuencia del trabajo de modelado estático se presenta aquí como una serie de pasos para construir un modelo para un sitio contaminado hipotético (el Sitio de Prueba). Comienza con los ejercicios de pensamiento necesarios para construir un modelo conceptual útil, pasa a las técnicas para transformar el modelo conceptual en un modelo numérico tridimensional (3D) y culmina con el proceso de usar el marco para crear un modelo de flujo.

## 3 Contexto y propósito

Antes de comenzar cualquier proyecto de modelado, los objetivos del proyecto deben estar claramente definidos. Se pueden realizar evaluaciones útiles de flujo y transporte utilizando modelos analíticos, a menudo a través de una hoja de cálculo. Una buena práctica es comenzar con lápiz y papel y ver cuántas preguntas pueden ser respondidas antes de construir un modelo numérico complicado. Si no existe otra opción, estos cálculos cuidadosos proporcionan una línea de base para evaluar la funcionalidad básica de futuros modelos más complejos.

### 3.1 Modelos Conceptuales

La mayoría de los proyectos ambientales relacionados a sitios con agua subterránea contaminada requieren la preparación de un modelo conceptual para cumplir con regulaciones gubernamentales. El modelo conceptual define los detalles básicos del acuífero contaminado; su geometría, profundidad, espesor, rango de variación de la conductividad hidráulica, alturas hidráulicas observadas, y características del sistema que influyen en el comportamiento hidráulico como la superficie de los cuerpos de agua y los pozos de agua. Para sitios contaminados pequeños, es probable que un modelo conceptual de detalle sea adecuado para cumplir con los requisitos reglamentarios pero que no brinde suficiente información para que el modelo prediga de manera efectiva el comportamiento del sistema y, por lo tanto, para diseñar el plan de remediación. Los modelos conceptuales que presentan estratos de gran espesor con propiedades homogéneas, son un indicador de que una revisión exhaustiva podría mejorarlos.

### 3.2 Geología Local

Una necesidad de cualquier modelo de subsuelo es estar familiarizado con la geología local. En algunos sitios, los datos como información de perforaciones de suministro de agua, investigaciones geotécnicas, y otros suelen ser abundantes. Incluso es frecuente contar con perfiles e interpretaciones ya publicadas. Es útil revisar reportes de otros proyectos de agua subterránea en el área para obtener información acerca de las propiedades y condiciones del subsuelo y aprender los problemas encontrados por otros que realizan un trabajo similar.

### 3.3 Geología Estructural

Los datos necesarios para identificar las características geológicas estructurales son esenciales pero no suficientes para muchos sitios contaminados. En consecuencia, es posible que las fallas no estén identificadas, y la superficie del lecho rocoso o basamento sea a menudo caracterizada como una superficie plana monótona o con una profundidad típica, mientras que en realidad podría tener una topografía compleja. La superficie del lecho rocoso es extremadamente importante en sitios con contaminantes en fase líquida no-

acuosa pesada (DNAPL) porque la DNAPL se hunde hacia capas de baja permeabilidad y la migración posterior está controlada por la topografía de la superficie de estas capas. Las fallas pueden encontrarse en cualquier lugar del mundo. Por ejemplo, áreas de la Costa del Golfo de Texas están afectadas por deformación superficial relacionada a fallas progresivas a pesar de que esa parte de Norteamérica es tectónicamente estable. Las pequeñas fallas se identifican, a menudo, en sitios contaminados, observando la ubicación de los gradientes hidráulicos más pronunciados. El Sitio de Prueba de ejemplo que se presenta en este libro contiene una pequeña falla normal.

### 3.4 Estratigrafía

La escasez de datos en sitios contaminados también presenta desafíos para delinear la estratigrafía. Sin embargo, en los últimos años se han recopilado más datos estratigráficos, ya que a menudo la complejidad estratigráfica está demostrando ser un factor limitante clave para una remediación exitosa. Los métodos de remediación que implican la extracción e inyección de agua subterránea pueden verse limitados por el flujo poco favorable a través de barreras estratigráficas de baja permeabilidad. Capas delgadas de suelo de grano fino, rico en arcilla y materia orgánica, pueden tener una alta capacidad para atrapar contaminantes del agua subterránea. Una vez que las porciones más permeables del acuífero han sido remediadas estos contaminantes pueden volver a difundirse en el agua subterránea limpia, provocando un aumento inesperado en las concentraciones. Cuando se utilizan tecnologías más antiguas como el barrenado y la perforación rotatoria, capas como estas pueden pasar por alto fácilmente. Para obtener registros con el nivel de detalle necesario se puede usar herramientas de detección como el logeo eléctrico de pozos y tecnología de empuje directo de alta resolución (Direct Push, DPT). Sin embargo, para hacer una determinación significativa de cómo estos detalles se extienden en el espacio entre pozos se requieren principios estratigráficos. Documentos guías como Schultz et al. (2017) contienen información detallada y esquemas de secuencias de trabajo que indican cómo realizar dichas evaluaciones estratigráficas.

Para los yacimientos de petróleo y gas, la gran parte de la caracterización se realiza considerando y comparando facies deposicionales sedimentarias (p.ej. Shepherd, 2009). Por ejemplo, la relativa homogeneidad de las facies eólicas (dunas de arena) conlleva a una mejor conectividad del reservorio que las turbiditas canalizadas de aguas profundas, de naturaleza estratificada y altamente diseccionada. Este tema es digno de su propio libro de texto y no se discute aquí excepto para decir que los proyectos ambientales pueden beneficiarse de esta misma línea de investigación. Una vez más, vale la pena mencionar que los sitios de aguas subterráneas contaminadas son a menudo de extensión limitada y generalmente se carece de fondos para recopilar los datos necesarios, lo que muchas veces hace imposible dicho análisis estratigráfico.

## 4 Construcción del Marco de Referencia

El marco geométrico es la base del modelado estático. Es orienta el sitio contaminado en tres dimensiones con respecto a las perforaciones que lo definen.

### 4.1 Mapas y Secciones Transversales

Durante muchos años los mapas y las secciones transversales constituían el marco completo para el modelado estático. Con el software informático moderno, esto ahora se hace en entornos 3D inmersivos que facilitan la conceptualización espacial. Sin embargo, los mapas y las secciones transversales aún sustentan las interpretaciones 3D de muchas maneras. En el ejemplo estudiado para la interpretación se utilizan mapas tradicionales y secciones transversales.

El Sitio de Prueba tiene un tamaño aproximado de 9 hectáreas y ha sido caracterizado por 14 perforaciones. Las perforaciones están dispuestas en dos transectos aproximadamente perpendiculares, y se perforaron a través de sedimentos no consolidados y terminaron en la parte superior del basamento. La superficie del terreno está entre 70-73 metros por encima del nivel del mar con pendiente hacia el sur. El basamento se encontró a profundidades desde 40 a 70 metros por debajo de la superficie del terreno. Los detalles geométricos que se usaron para construir el marco interpretativo se muestran en la Figura 1 donde las dos secciones transversales han sido acomodadas inmediatamente al lado del mapa, con todo dibujado a escala.

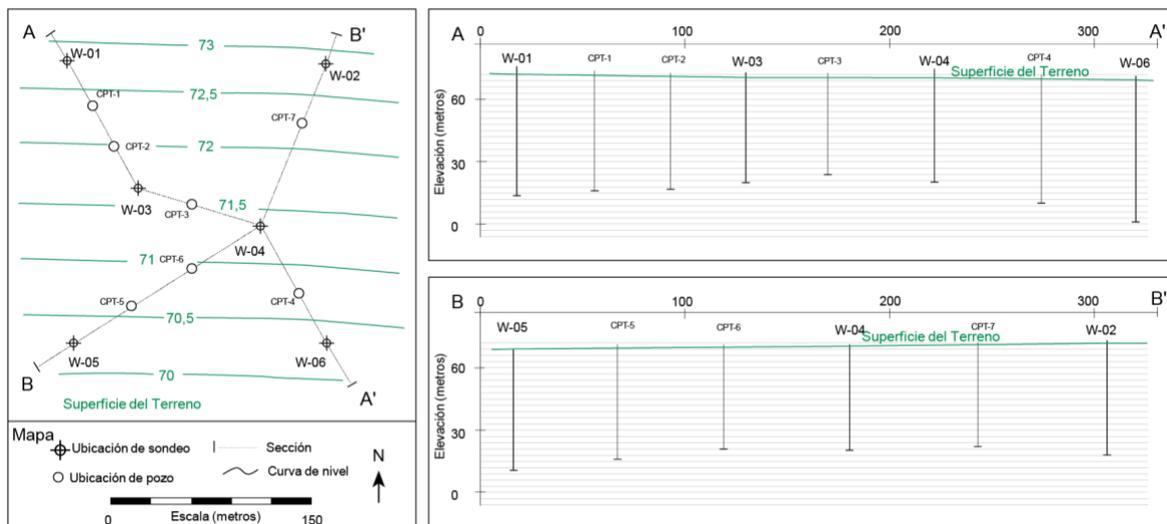


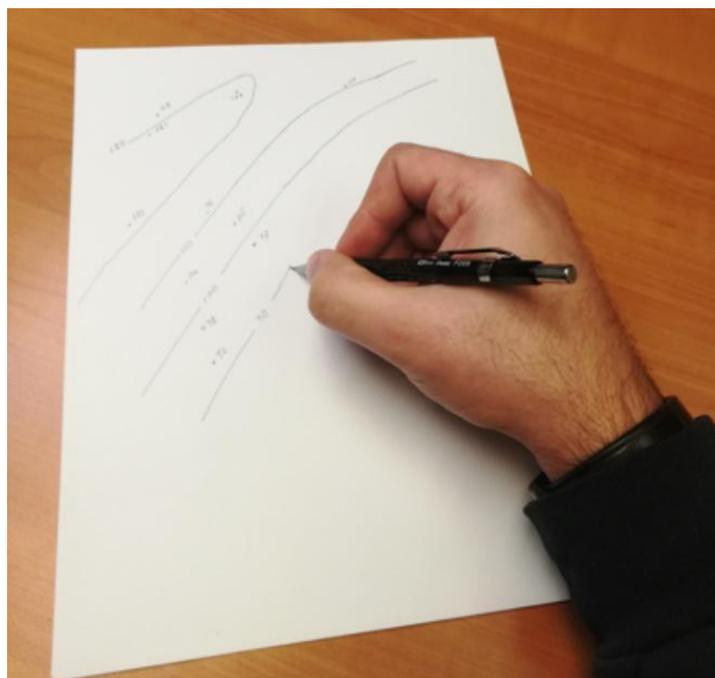
Figura 1 - Marco de interpretación (Brandenburg, 2020).

### 4.2 Superficies

La interpretación geológica implica dividir el subsuelo en capas. Los estratígrafos están interesados en horizontes y zonas que representan tiempos geológicos específicos, los geólogos estructurales intentan identificar superficies que originalmente eran horizontales y los geofísicos buscan capas de rocas con propiedades acústicas contrastantes.

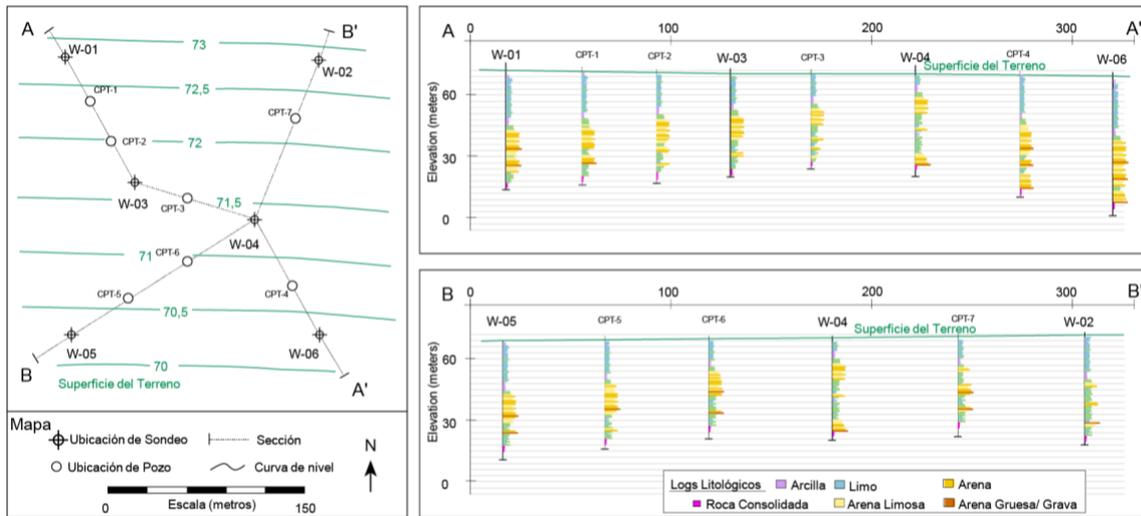
Independientemente de esto, la construcción de superficies tridimensionales es una parte esencial del modelado geológico del subsuelo. La forma más sólida de hacer esto es crear mapas de contorno con los datos que definen la superficie de interés, creando contornos estructurales: mapas con líneas de igual elevación que definen la superficie geológica de interés. Los mapas de contornos estructurales son análogos a los mapas de contornos topográficos.

Realizar mapas de contornos a mano (Figura 2) en lugar de confiar en un algoritmo informático tiene la ventaja de incorporar el entendimiento humano de las características geológicas típicas, mientras que el software no tiene el beneficio del sentido común en áreas de datos escasos. Los mapas de contorno hechos a mano son útiles como control de calidad de mapas de contornos generados con software de computadora, particularmente para superficies que son discontinuas debido a fallamiento.



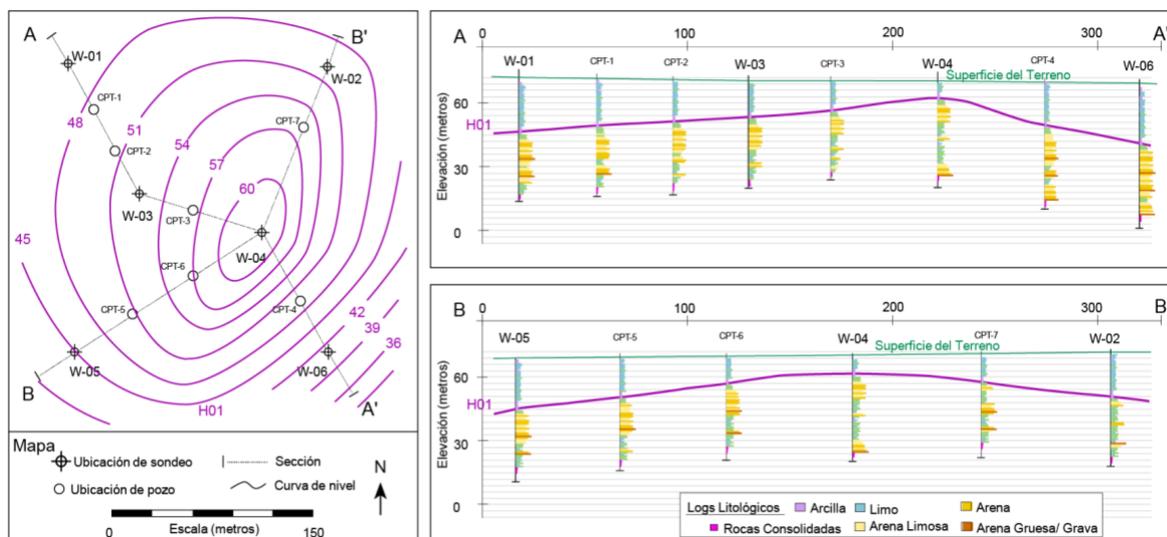
**Figura 2** - Dibujar contornos estructurales a mano es un método confiable para la interpretación geológica (Brandenburg, 2020).

En el Sitio de Prueba, se generaron registros litológicos detallados para cada pozo utilizando una combinación de muestras recolectadas durante la perforación y datos recolectados por otros dispositivos de detección de pozos (Figura 3). Aquí, el registro litológico fue generado usando un Ensayo de Penetración en Cono (CPT): un método para detectar directamente cambios en las propiedades mecánicas de los materiales no consolidados durante la perforación. El CPT se emplea comúnmente para investigaciones ambientales y tiene la ventaja de producir registros en intervalos discretos en lugar de una curva continua. Para el Sitio de Prueba, los registros litológicos discretos diferencian entre el lecho rocoso y seis clases de arcilla, limo, arena y grava.



**Figura 3** - Registros (logs) litológicos discretos en el Sitio de Prueba. Las líneas de contornos muestran la elevación de la superficie del suelo sobre el nivel del mar. (Brandenburg, 2020).

El análisis de los registros revela la presencia de sedimentos grano decreciente que se adelgazan sobre un lecho rocoso elevado. Las superficies guía identificadas son la parte superior del lecho rocoso o basamento y una arcilla lateralmente continua que separa los estratos más gruesos de los limos y arcillas más someros. Basado en las condiciones levemente artesianas observadas al instalar los pozos de monitoreo, la capa de arcilla se comporta como un acuitardo filtrante. Esto se mapea como horizonte estratigráfico H01 como se muestra en la Figura 4. Basado en el conocimiento de sitios similares en la región, el horizonte se mapea como un anticlinal aproximadamente simétrico.

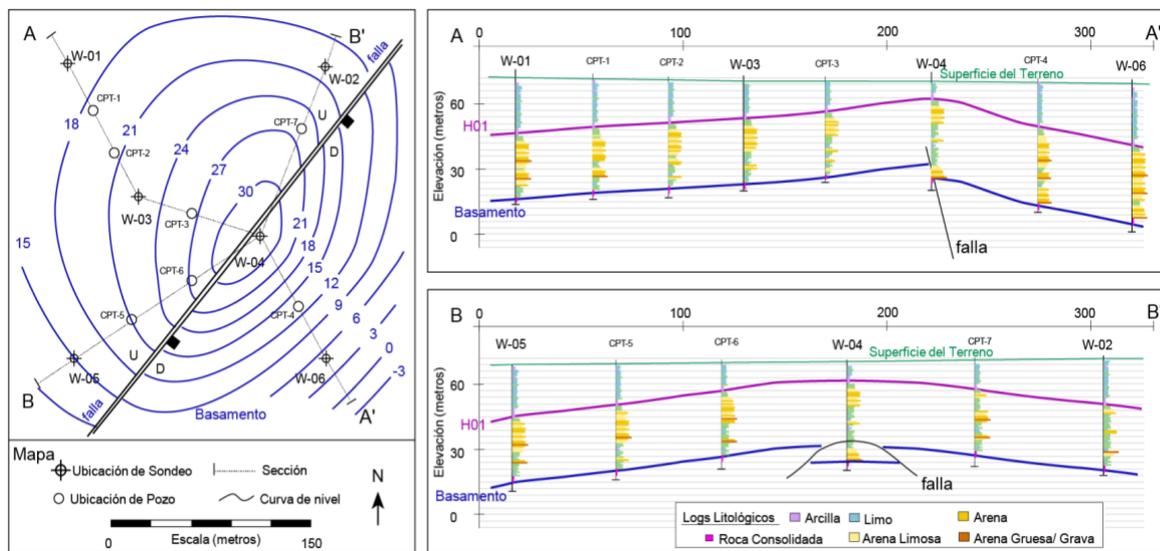


**Figura 4** - Horizonte Estratigráfico H01. Las líneas de contornos muestran la elevación del horizonte estratigráfico H01 sobre el nivel del mar (Brandenburg, 2020).

Se sabe que el lecho de roca en esta ubicación está estructurado por fallas normales de orientación noreste-suroeste. La escarpa de falla fue identificada por una unidad de grano grueso presente en la base del pozo W-04, que no fue observada en otros pozos. El

espesor del intervalo estratigráfico entre H01 y el lecho rocoso es mayor en los pozos W-04, CPT-7 y W-02 en comparación con el espesor encontrado en los pozos CPT-6, CPT-5 y W-05. Esto indica que la falla es una falla de crecimiento que probablemente no alcanza el nivel H01. Esto da como resultado la necesidad de un desplazamiento en la superficie del basamento en el mapa de contorno que se muestra en la Figura 5.

Este tipo de escarpa de falla pequeña y cubierta, es común, particularmente en áreas tectónicamente activas como el oeste de los Estados Unidos. La interpretación de fallas en perforaciones es otro tema muy interesante, más allá del alcance de este libro. En el Sitio de Prueba, la falla es importante porque la sección arenosa es más potente y de grano más grueso en el lado bajo de la falla. Si esta característica fuera importante para el proyecto (por ejemplo, si hubiera contaminación por DNAPL), se podrían emplear métodos geofísicos que sean adecuados para detectar la profundidad de la interfaz sedimento / basamento.



**Figura 5** - Superficie estructural que define el techo del basamento. Las líneas de contorno muestran la elevación del techo del basamento sobre el nivel del mar. Las líneas de contornos son discontinuas alrededor de la falla. (Brandenburg, 2020, [gw-project.org](http://gw-project.org)).

En la industria del petróleo, los modelos estáticos se enfocan en la parte del reservorio con fluidos móviles. En este Sitio de Prueba ejemplo, la sección de interés constituye el estrato de grano grueso entre el techo del basamento y H01. En la evaluación de petróleo y gas, el volumen de roca entre esas superficies se denominaría yacimiento. Aquí, es el acuífero. En algunos proyectos de aguas subterráneas, la naturaleza del material de grano fino es importante para caracterizar la capacidad que presenta para almacenar o liberar agua, o la química y potencial para transferir componentes químicos por difusión.

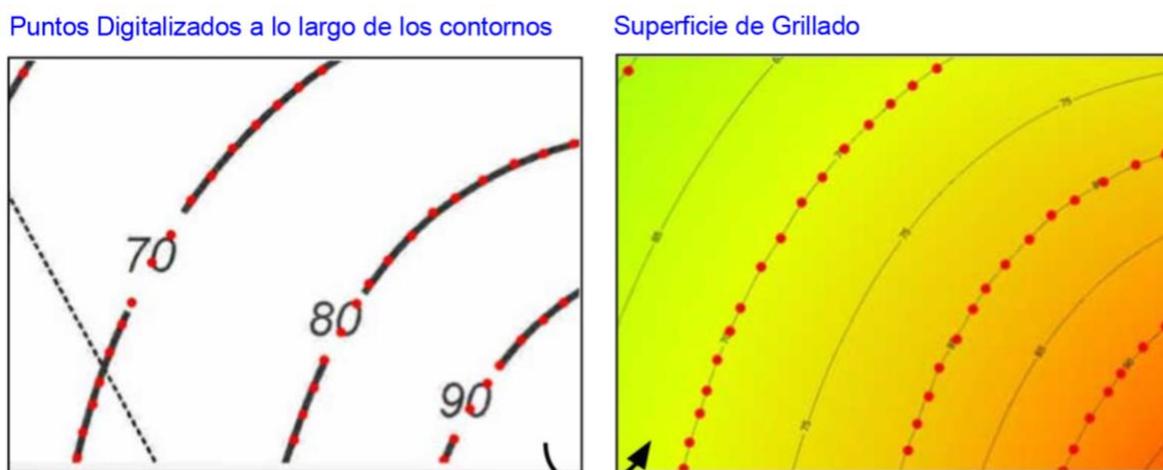
### 4.3 Grillado

A continuación, las superficies definidas a lo largo de las secciones transversales se extienden utilizando una técnica de interpolación (denominada cuadrículado o grillado) que permite definir una vista de su elevación en planta bidimensional. Esto proporciona

una elevación para cada superficie de interés, a intervalos de grilla regulares en todo el sitio, lo cual es una necesidad para realizar simulaciones tridimensionales. El método más sencillo de construcción de una grilla es utilizar observaciones puntuales como la elevación de un estrato en pozos particulares como entrada directa a los algoritmos de grillado, lo cual se puede hacer en programas comerciales como [EVS](#) o [Surfer](#). Estos programas fueron creados principalmente para la visualización de datos, pero también se pueden utilizar para preparar superficies grilladas para modelos.

La calidad de los datos de entrada es muy importante para este proceso. El grupo de datos ideales contiene puntos que están espaciados uniformemente, cubren toda el área que será grillada, y han sido revisados para detectar inconsistencias y validados. Con un conjunto de datos de este tipo, la mayoría de los algoritmos producirán la misma superficie de grillado. El uso de un conjunto de datos escasos, espaciados irregularmente e internamente inconsistentes es una fuente importante de error en el modelado geológico. La salida de diferentes algoritmos de grillado puede variar drásticamente en respuesta a datos inconsistentes y datos atípicos. Algunos resultados comunes son los ojos de buey alrededor de puntos de datos únicos y superficies que se extienden significativamente más allá de los límites de los datos originales. ([Ver ejemplos de Cuadro 1](#)).

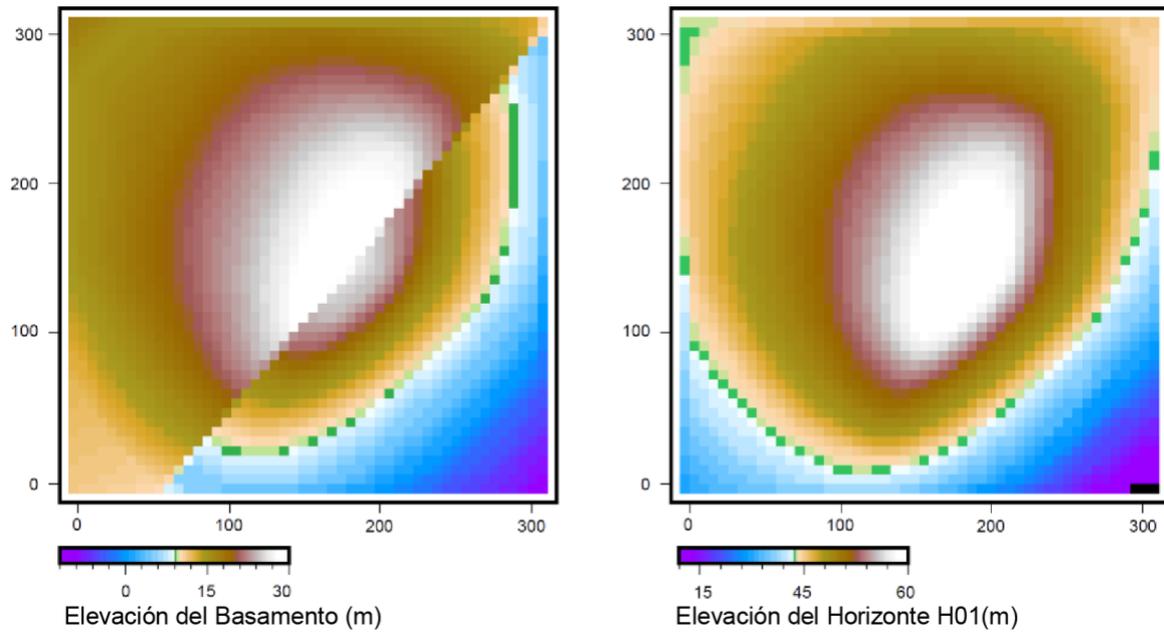
En situaciones con datos dispersos o irregulares, se requiere un método sistemático e idealmente basado en la geología para guiar el algoritmo de grillado en el “espacio en blanco” entre observaciones. Algunos ejemplos de software disponible para este tipo de modelado geológico 3D son, [Visual MODFLOW Flex](#) y [RockWorks](#). Para el Sitio de Prueba, se utiliza el método relativamente simple de digitalizar contornos a mano para así crear puntos de datos adicionales para el algoritmo de grillado, y no requerir software especial. (Figura 6).



**Figura 6** - Los algoritmos de grillado necesitan de asistencia en áreas con datos dispersos. Aquí, se digitalizaron líneas de contorno hechas a mano para aportar datos al algoritmo de grillado. (Brandenburg, 2020).

En el modelo del Sitio de Prueba, los datos contorneados a mano se digitalizaron y luego se grillaron con una discretización de nodos de cuadrícula de 50 por 50 (las celdas de

la grilla tienen aproximadamente 15 metros por 15 metros). Esta "grilla de 50x50" se utiliza para los cálculos en el resto del libro.



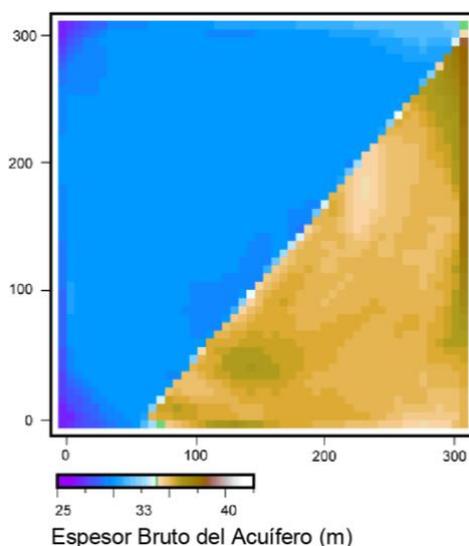
**Figura 7** - Superficies de grillado del techo del basamento (izquierda) y H01 (derecha). Cada cuadrado tiene asignado un valor de elevación de la superficie con su magnitud indicada por el color del cuadrado. Ploteado con "Open-Source Generic Mapping Tools" ([GMT](#)) (Brandenburg, 2020).

## 5 Cálculo de Propiedades

Una vez que el marco tridimensional está definido y grillado, el próximo paso es rellenar la grilla con los valores de las propiedades hidráulicas necesarias para la simulación.

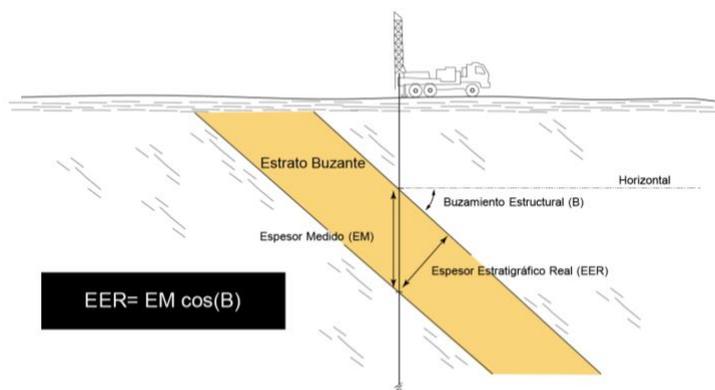
### 5.1 Espesor Bruto

La propiedad más sencilla de definir es el espesor del reservorio o acuífero, la cuál es la distancia vertical entre las superficies limitantes. (Figura 8).



**Figura 8** - Grilla del espesor del acuífero. Esta es la diferencia entre la grilla de HO1 y la superficie del basamento. (Brandenburg, 2020).

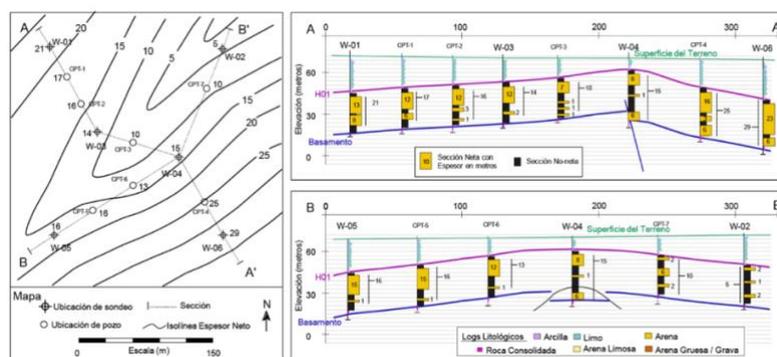
Para estratos inclinados o plegados, puede ser necesario aplicar una corrección trigonométrica de buzamiento (Figura 9). En el ejemplo del Sitio de Prueba, la deformación estructural es relativamente menor, por lo que no se aplica ninguna corrección por buzamiento.



**Figura 9** - Cálculo del espesor estratigráfico real a partir de las medidas del buzamiento del estrato en la perforación (Brandenburg, 2020).

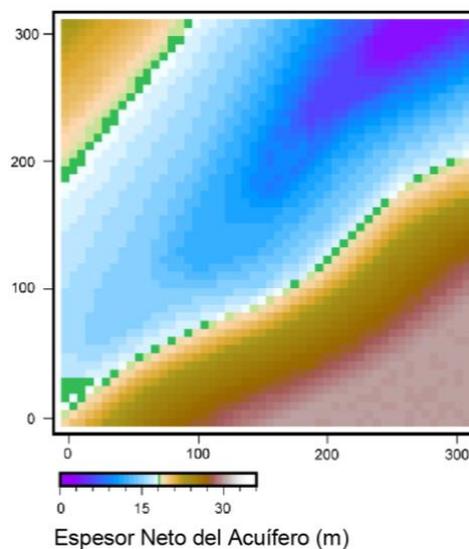
## 5.2 Espesor Neto

Las arcillas y rocas relacionadas a ellas, como el esquisto, tienen una porosidad volumétrica grande pero desconectada y representan un volumen del acuífero que no está involucrado en el flujo activo, lo cual es importante para evaluar los sitios de contaminación del agua subterránea (Payne et al., 2008). La porción "que fluye" del reservorio o acuífero se identifica como "sección neta". Para determinar esto, se selecciona un valor de corte (cutoff) de tamaño de grano y los registros geológicos se separan en "bloques" de zonas netas (sedimentos gruesos) y no-netas (sedimentos finos). El espesor de la zona neta se contabiliza para cada registro geológico de pozo y luego se crean contornos de espesor neto como se muestra en la Figura 10. En este caso, el mapa resultante es un mapa isopáquico donde los contornos representan líneas de espesor constante en lugar de elevación constante.



**Figura 10** - Cuantificación del Espesor Neto a partir de registros en bloques de y mapa isopáquico (Brandenburg, 2020).

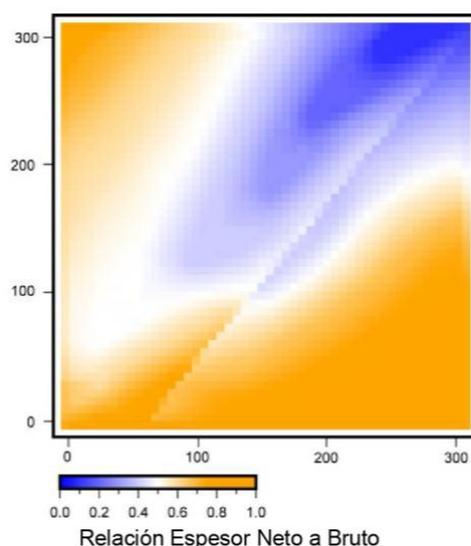
Las líneas de contornos de isoespesor luego son grilladas usando el mismo proceso que para los horizontes del paso anterior (Figura 11).



**Figura 11** - Grillado del Mapa de Espesor Neto (Brandenburg, 2020, [gw-project.org](http://gw-project.org)).

### 5.3 Relación Espesor Neto a Bruto

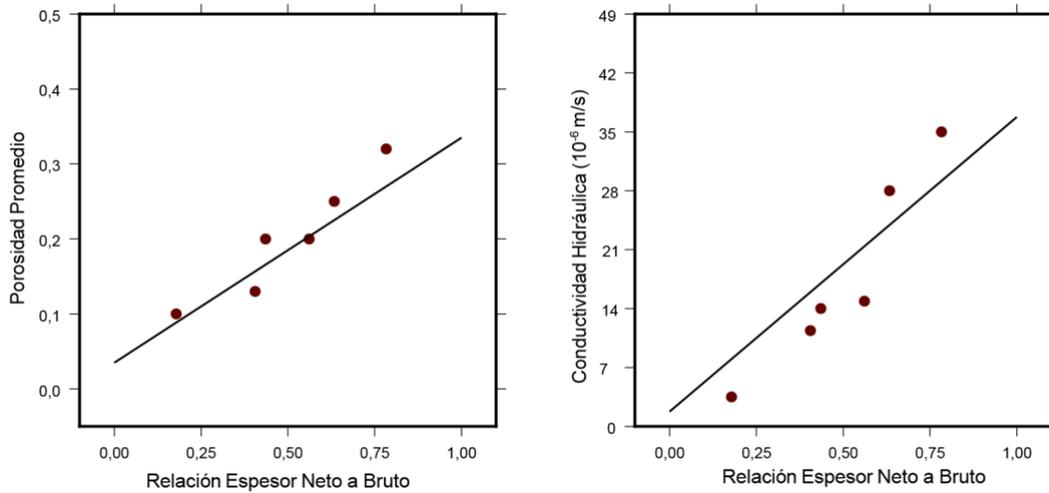
Una vez que se han mapeado y grillado los datos del espesor neto y bruto, es sencillo calcular la proporción (ratio) de los dos. El espesor neto dividido el espesor total es la relación entre el espesor neto y el espesor bruto, un valor entre 0 y 1 que suele denominarse neto a bruto (Figura 12). Independientemente de las facies sedimentarias, las capas con alta relación neta a bruta tienden a ser permeables e hidráulicamente bien conectadas. Mientras que las capas con baja relación neta a bruta, si bien pueden ser permeables en pozos individuales, es mucho más probable que estén rotas constituyendo compartimentos desconectados.



**Figura 12** - Grilla de Relación Neto a Bruto (Brandenburg, 2020).

### 5.4 Propiedades

En la evaluación de reservorios de petróleo y gas, se sabe desde hace mucho tiempo que la relación entre el espesor neto y el espesor bruto en reservorios clásticos se correlaciona de manera confiable con las propiedades de los reservorios en conjunto. La porosidad y la permeabilidad son, a menudo, mapeadas de forma directa a partir de los valores de la relación entre espesor neto y bruto usando funciones de interpolación únicas para cada campo de petróleo. En el Sitio de Prueba, la porosidad y la conductividad hidráulica están estimadas en base a la correlación entre la relación espesor neto y bruto y las mediciones de porosidad y conductividad hidráulica hechas en pozos de monitoreo permanente como se muestra en la Figura 13.



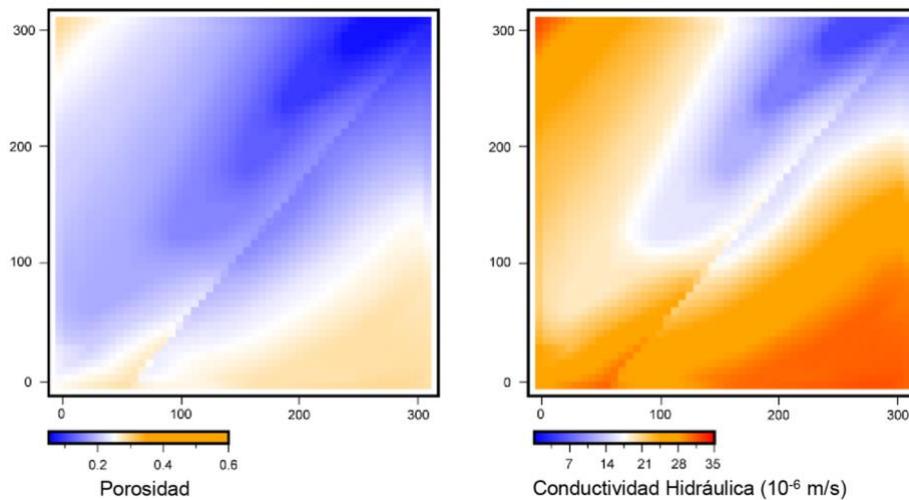
**Figura 13** - Correlación entre la relación Espesor Neto / Bruto de cada pozo versus la porosidad y conductividad hidráulica medida en ellos (Brandenburg, 2020).

Las ecuaciones para las líneas de la Figura 13 son (Ecuaciones 1 y 2):

$$Porosidad = \phi = 0,3 \left[ \frac{N}{G} \right] + 0,035 \quad (1)$$

$$Conductividad Hidráulica = K = (35 \times 10^{-6}) \left[ \frac{N}{G} \right] + (1,8 \times 10^{-6}) \quad (2)$$

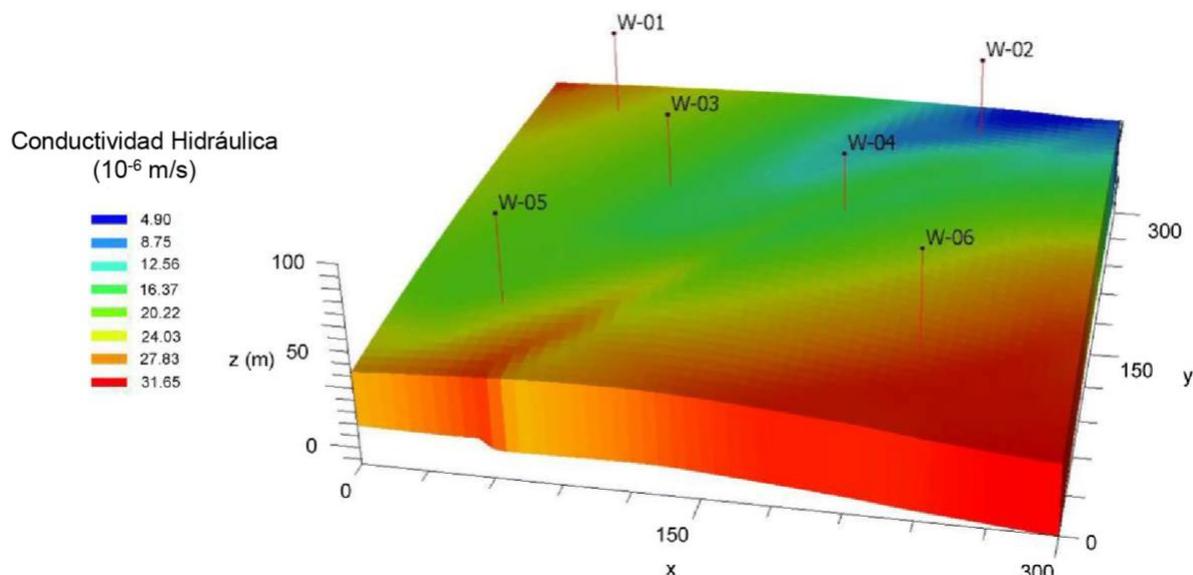
Una vez que se han establecido estas relaciones específicas del acuífero, se puede calcular para cada ubicación de la grilla dada, su valor neto a bruto y así crear propiedades acuíferas para cada celda de la grilla de 50x50 (Figura 14).



**Figura 14** - Grillageo de porosidad y conductividad hidráulica calculadas a partir de las Ecuaciones 1 y 2 (Brandenburg, 2020).

## 6 El Modelo

El modelo mostrado en la Figura 15 fue ensamblado usando Visual Modflow FLEX con la grilla poblada usando las relaciones de porosidad y conductividad hidráulica de la sección anterior.



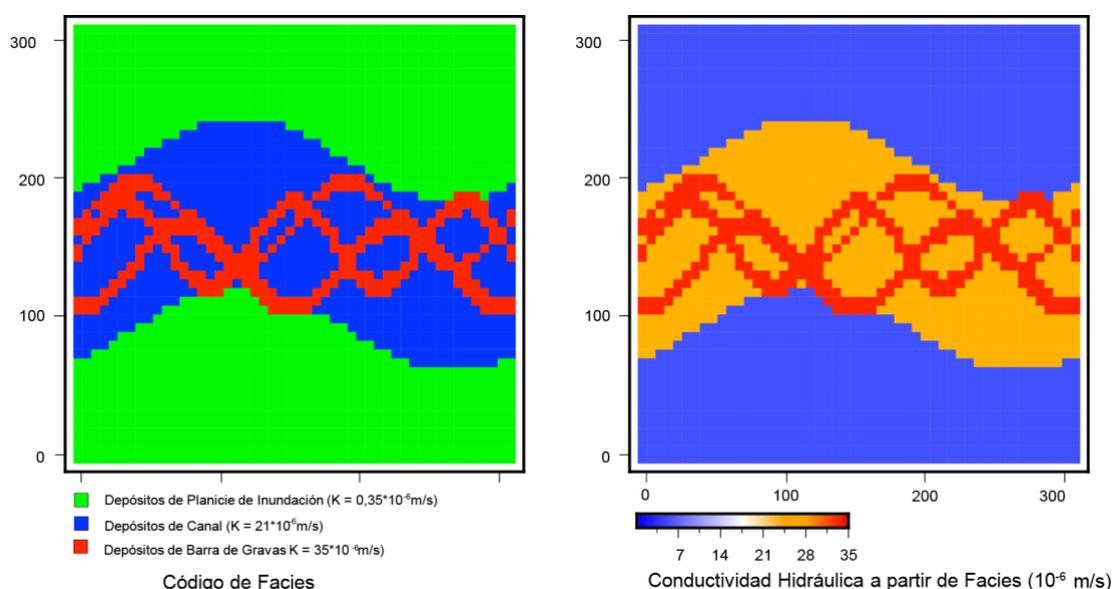
**Figura 15** - Mapeo de la Conductividad Hidráulica en modelo de grilla de tres dimensiones, en Visual MODFLOW FLEX (Brandenburg, 2020).

En este punto, el modelo está listo para ser usado para simulaciones dinámicas. No obstante, este modelo se presenta para ilustrar los principios de delimitación del subsuelo a partir de datos de pozo. El mismo representa el sitio como una sola capa, mientras que los modelos de aguas subterráneas generalmente requieren múltiples capas para representar sistemas con múltiples acuíferos, características de diseño dentro de un sistema de aguas subterráneas y / o la compleja heterogeneidad geológica, especialmente cuando se simula el transporte de contaminantes o la remediación.

Para un modelo multicapa, los horizontes estratigráficos se pueden modelar utilizando los mismos métodos descritos en este libro. También se pueden aplicar métodos geoestadísticos; por ejemplo, la mayoría de los programas de preprocesamiento de modelado de aguas subterráneas permiten interpolar propiedades como la conductividad hidráulica entre los valores observados utilizando un algoritmo geoestadístico como Kriging.

## 7 Creación de un modelo estático a partir del mapeo de facies

Un método usado frecuentemente para captar la heterogeneidad de un modelo petrolero estático es el mapeo de facies. Las facies geológicas son grupos de rocas, sedimentos o suelos con un origen e historia geológica común, que en este contexto conducen a un comportamiento hidrológico semejante. Por ejemplo, en un sistema fluvial los sedimentos de la llanura aluvial tenderían a tener abundantes capas de barro de grano fino, dando baja conductividad hidráulica y una relación de conectividad vertical a horizontal mucho menor que uno. Por el contrario, un depósito de barra de punta de gravas tendría una alta conductividad hidráulica con una relación de conductividad hidráulica vertical a horizontal más cercana a la unidad. En el mapeo de facies, a cada celda de la grilla se le asigna un código de facies que luego se "mapea" como un conjunto de parámetros hidráulicos correspondiente (Figura 16).

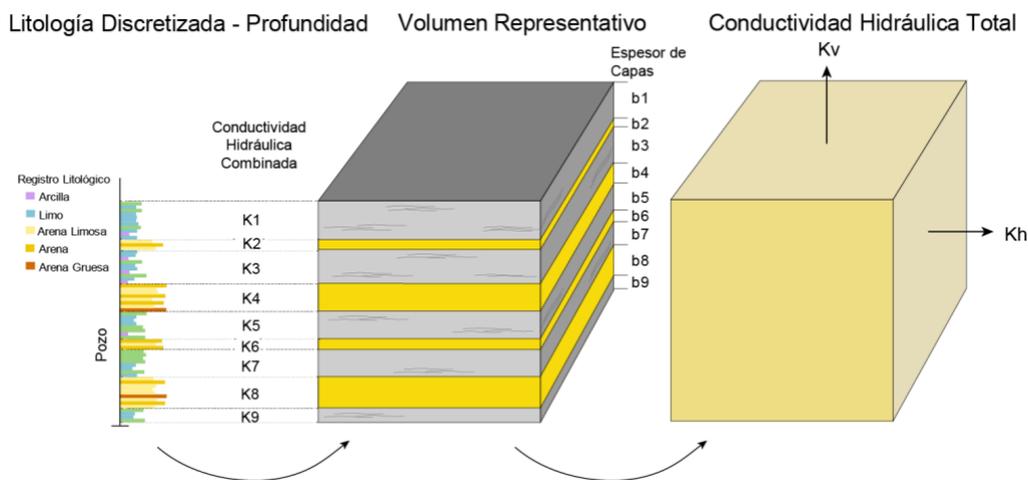


**Figura 16** - Conductividad Hidráulica a partir del mapeo de facies (Brandenburg, 2020).

Por supuesto, las facies solo se conocen en la ubicación de los pozos; el resto debe ser asignado por algún proceso. En el escenario más simple, esto se asigna según la intuición del modelador. Sin embargo, se podrían desarrollar muchos mapas de facies diferentes pero igualmente válidos. Esta es la base para modelos geoestadísticos más avanzados que respetan simultáneamente tanto las limitaciones estadísticas como los principios geológicos. Algunos de estos modelos son muy complejos y representan los tipos de heterogeneidad observados en afloramientos rocosos cuidadosamente medidos y en otros estudios geológicos a una escala mucho más fina que la resolución de la grilla del modelo de flujo. El uso de esto como base para un modelo de flujo requiere una técnica de escalamiento cuantitativo para asegurarse de que las propiedades de flujo a escala fina se retengan en la cuadrícula más gruesa.

## 8 Creación de un modelo estático a partir de Propiedades Escaladas

Una metodología más directa pero que requiere mucha mano de obra es rellenar el modelo utilizando propiedades hidráulicas "escaladas" a partir de datos disponibles de mayor detalle. Si de un pozo se sacan testigos, entonces se pueden enviar muestras de suelo o roca no perturbadas a un laboratorio para pruebas de porosidad y conductividad hidráulica. Esto permite la correlación entre litología y propiedades hidráulicas a una escala de pulgadas. Luego a partir de testigos de perforación, se construye un volumen representativo, con un esquema de capas estratificadas siguiendo los principales tipos de litología definidos. A cada capa se le asigna una conductividad hidráulica "combinada" que representa un promedio estadístico de las mediciones de laboratorio para esa litología. Estas capas luego se traducen en una conductividad hidráulica vertical ( $K_v$ ) y horizontal ( $K_h$ ) total (Figura 17).



**Figura 17** - Escalamiento desde conductividad hidráulica a profundidades discretas a una conductividad hidráulica total (Brandenburg, 2020).

La conductividad hidráulica total se calcula como la media aritmética de las capas unitarias, como se muestra en la Ecuación 3 del ejemplo de la Figura 17.

$$K_h = \frac{K_1 b_1 + K_2 b_2 + K_3 b_3 + K_4 b_4 + K_5 b_5 + K_6 b_6 + K_7 b_7 + K_8 b_8 + K_9 b_9}{b_1 + b_2 + b_3 + b_4 + b_5 + b_6 + b_7 + b_8 + b_9} \quad (3)$$

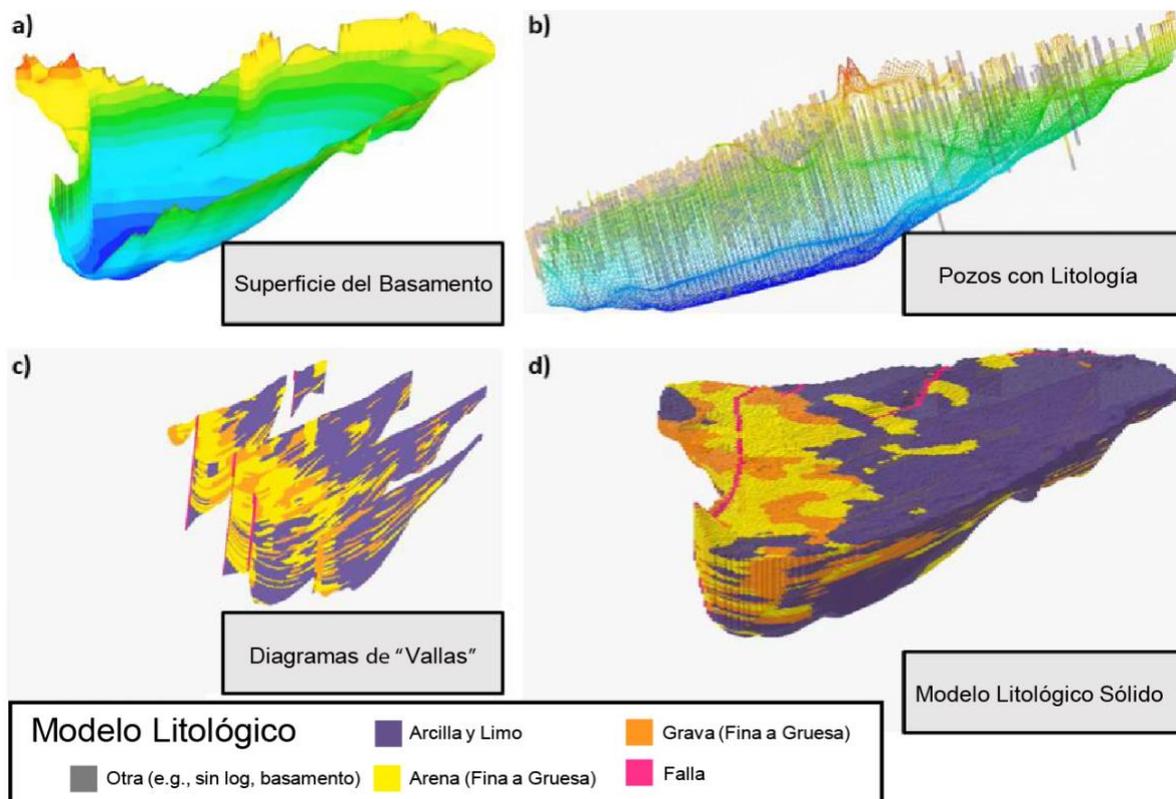
La porosidad total también se calcula como la media aritmética. La conductividad hidráulica vertical total se calcula como la media armónica de las capas unitarias combinadas, como se muestra en la Ecuación 4 del ejemplo de la Figura 17.

$$K_v = \frac{b_1 + b_2 + b_3 + b_4 + b_5 + b_6 + b_7 + b_8 + b_9}{\frac{b_1}{K_1} + \frac{b_2}{K_2} + \frac{b_3}{K_3} + \frac{b_4}{K_4} + \frac{b_5}{K_5} + \frac{b_6}{K_6} + \frac{b_7}{K_7} + \frac{b_8}{K_8} + \frac{b_9}{K_9}} \quad (4)$$

En general, la media armónica es representativa de la  $K$  de las capas perpendiculares a la dirección de flujo, mientras que la media aritmética representa la  $K$  de las capas paralelas al flujo. Si bien este método es preciso en un volumen que rodea inmediatamente al pozo, se requiere algún método sistemático para extender estos resultados al resto del volumen del modelo. En la práctica, esto a menudo se logra combinando el “escalado” con métodos de modelado estocástico.

## 9 Creación de un modelo estático a partir de datos litológicos

Cuando los datos geológicos disponibles son suficientes para definir un marco de modelación de agua en [RockWorks](#), estos pueden ser usados para crear una grilla de tipos de litología a lo largo del dominio del modelo, con propiedades hidráulicas asignadas a cada tipo litológico (Figura 18). [Una vista animada de un modelo se muestra en este video](#). La animación de 35 segundos (~80Mb) rota la cuenca en un espacio tridimensional mientras muestra: la superficie del lecho rocoso; los registros litológicos usados para definir la distribución de la litología; diagramas de vallas a lo largo de unas pocas secciones transversales; y el modelo sólido final dividido secuencialmente de oeste a este y viceversa, luego de sur a norte y viceversa. Los materiales de grano fino se muestran en morados, los de grano medio en amarillo y los de grano grueso en naranja con fallas en rojo.



**Figura 18** - Modelo litológico comenzando con a) definición de la superficie del basamento; b) definición de tipos litológicos en cada pozo; c) unos pocos diagramas de vallas después de la interpolación y extrapolación de tipos litológicos entre pozos; y d) modelo litológico sólido. Imágenes provistas por RockWare (2020).

## 10 Resumen

En este libro, los conceptos sobre modelación subterránea fueron presentados en una secuencia de trabajo desde un contexto de modelo estático a dinámico. Cada proyecto de agua subterránea es único, y esta secuencia de trabajo debería ser vista más como una estructura de organización recomendada que como un procedimiento estricto. Las limitaciones típicas relacionadas a la escasez de datos a nivel local hacen que la conceptualización inicial de los modelos estructurales y estratigráficos sean un paso crítico del proceso. Las aproximaciones a partir de una secuencia de trabajo establecido tiene el beneficio de proporcionar al proceso la garantía de que las ediciones a los supuestos previamente asumidos y las limitaciones de los datos se incorporen en todos los niveles del proyecto terminado. Si bien algunas de las técnicas discutidas aplican solamente a acuíferos clásticos, el método de construir un marco para el modelo 3D a partir de mapas, secciones transversales y superficies de contorno es aplicable universalmente. Toda la modelación estadística y litológica más avanzada, discutida en la actualidad, se basa en un marco 3D robusto. Dibujar esquemas 3D en lápiz y papel o pizarra, en equipo, también es una excelente manera de generar consenso, definir suposiciones y facilitar la comunicación. Usar esto como punto de partida para modelar proyectos es una de las mejores prácticas.

## 11 Referencias

Brandenburg, J.P., 2020, Figuras originales.

Payne, F., J. Quinnan, y S. Potter, 2008, Remediation Hydraulics, 1<sup>st</sup> Edition. Chemical Rubber Company (CRC) Press.

RockWare, 2020, <https://ww.rockware.com/product/rockworks/>.

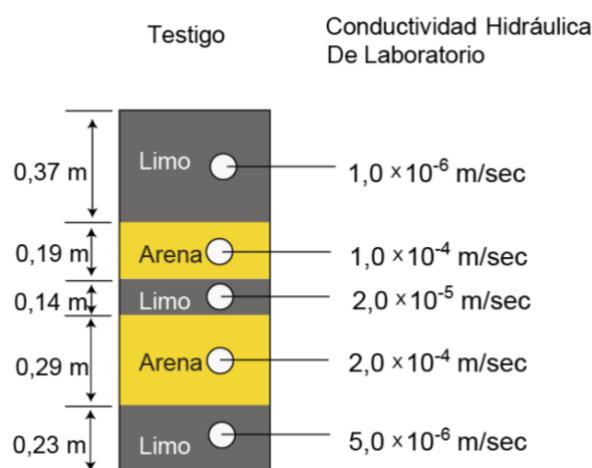
Schultz, M., R. Cramer, C. Plank, H. Levine, K. Ehman, 2017, Best practices for environmental site management: A practical guide for applying environmental sequence stratigraphy to improve conceptual site models. Technical Report. [https://cfpub.epa.gov/si/si\\_public\\_file\\_download.cfm?p\\_download\\_id=536250&Lab=NRMRL](https://cfpub.epa.gov/si/si_public_file_download.cfm?p_download_id=536250&Lab=NRMRL).

Shepherd, M., 2009, Oil field production geology, AAPG Memoir 91, The American Association of Petroleum Geologists, Tulsa, Oklahoma, 350 pages, <https://doi.org/10.1306/M911316>.

## 12 Ejercicios

Un método para analizar testigos de suelo y rocas recolectados durante la perforación consiste en medir las propiedades hidráulicas de una muestra pequeña de tamaño centimétrico tomada de un testigo más grande (“tacos de testigo”) en el laboratorio. Antes de usar los resultados en simulaciones de flujo se requiere realizar cálculos de las propiedades de todo el conjunto.

Considera el siguiente testigo tomado de un depósito de limos y arenas estratificados. El testigo es de 1.22 metros de longitud orientado verticalmente. La conductividad hidráulica fue calculada para cinco tacos de testigo:



### Ejercicio 1

Si solo el flujo del agua subterránea a través de la arena es significativo, ¿cuál es la relación espesor neto / bruto de este testigo?

[Toque aquí para ir a la solución de este ejercicio 1 ↴](#)

### Ejercicio 2

¿Cuáles son las conductividades hidráulicas verticales y horizontales totales calculadas del volumen representativo?

[Toque aquí para ir a la solución de este ejercicio 2 ↴](#)

### Ejercicio 3

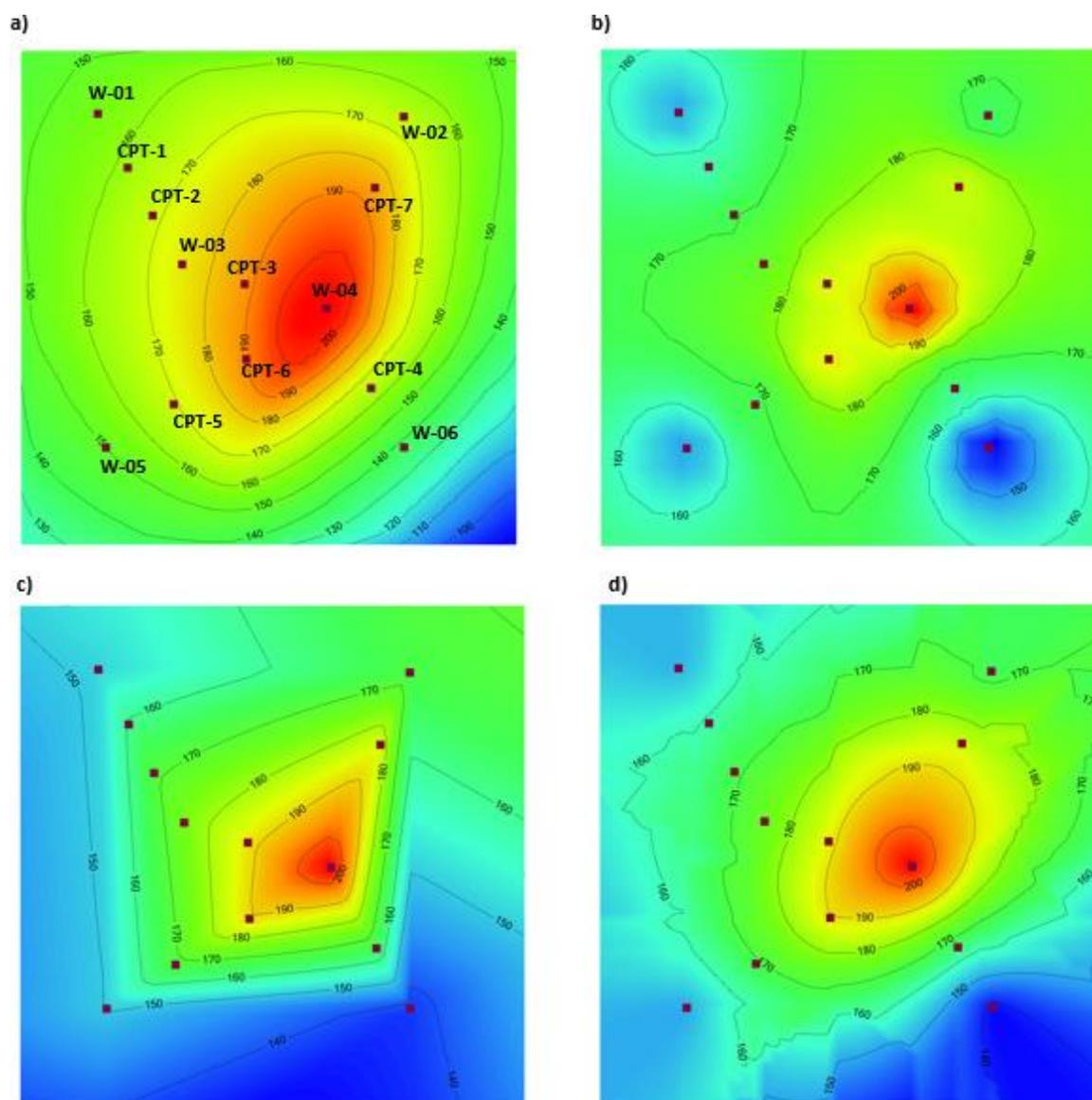
¿Qué más necesitaría antes de utilizar las propiedades hidráulicas totales calculadas para un modelo de flujo?

[Toque aquí para ir a la solución de este ejercicio 3 ↴](#)

## 13 Cuadros

### Cuadro 1 - Grillado con Datos Dispersos

Con datos de un número suficiente de pozos, todos los algoritmos de grillado deberían reproducir la misma superficie geológica. Con datos dispersos, las superficies divergen unas de otras. En la Figura 19 se muestra, para el Sitio de Prueba, la grilla de la superficie H01 creada a partir de los datos de elevación medidos en los 14 pozos usando algunos métodos de grillado diferentes.



**Figura 19** - Grillado de la superficie H01 usando solo los datos de elevación medidos en los 14 pozos: a) contornos estructurales representando la geología "real" hechos a mano; b) algoritmo de la inversa de la distancia; c) algoritmo del vecino natural; y, d) algoritmo de Kriging. (Brandenburg, 2020, [gw-project.org](http://gw-project.org))

Estas imágenes fueron creadas con algoritmos de grillado disponibles en Visual MODFLOW FLEX (Waterloo Hydrogeologic, 2020) usando principalmente parámetros predeterminados. Con experiencia, los parámetros de grillado se pueden ajustar para crear una superficie más cercana a lo que se espera para H01. Esto es particularmente cierto para Kriging, que está diseñado para conjuntos de datos geológicos irregulares. Sin embargo, más allá de la elección del algoritmo, se requiere algún concepto previo de la geología.

La representación / funcionamiento de los algoritmos de grillado es siempre más pobre en las zonas periféricas de la grilla. Los algoritmos realizan la *interpolación* dentro de un área delineada por los puntos de datos, y la *extrapolación* afuera. Inherentemente, la extrapolación es más incierta, lo cual puede resultar en la aplicación de artilugios de grillado cuando los bordes de la grilla están alejados de los puntos de datos.

[Volver a donde el texto vincula el Recuadro 1](#) ↑

## 14 Soluciones de los Ejercicios

### Ejercicio 1 – Solución

Si solo el flujo del agua subterránea a través de la arena es significativo, ¿cuál es la relación espesor neto / bruto de este testigo?

$$\text{Neto/Bruto} = \frac{0,19 + 0,29}{0,37 + 0,19 + 0,14 + 0,29 + 0,23} = 0,39$$

[Volver al ejercicio 1](#) ↑

### Ejercicio 2 – Solución

¿Cuáles son las conductividades hidráulicas verticales y horizontales totales calculadas del volumen representativo?

$$Kv = \frac{0,37 + 0,19 + 0,14 + 0,29 + 0,23}{\frac{0,37}{1,0 \times 10^{-6}} + \frac{0,19}{1,0 \times 10^{-4}} + \frac{0,14}{2,0 \times 10^{-5}} + \frac{0,29}{2,0 \times 10^{-4}} + \frac{0,23}{5,0 \times 10^{-6}}}$$

$$\text{Conductividad hidráulica total Vertical} = Kv = 2,9 \times 10^{-6} \frac{m}{s}$$

$$Kh = \frac{(1,0 \times 10^{-6} * 0,37) + (1,0 \times 10^{-4} * 0,19) + (2,0 \times 10^{-5} * 0,14) + (2,0 \times 10^{-4} * 0,29) + (5,0 \times 10^{-6} * 0,23)}{0,37 + 0,19 + 0,14 + 0,29 + 0,23}$$

$$\text{Conductividad hidráulica total Horizontal} = Kh = 6,7 \times 10^{-5} \frac{m}{s}$$

[Volver al Ejercicio 2](#) ↑

### Ejercicio 3 – Solución

¿Qué más necesitaría antes de utilizar las propiedades hidráulicas totales calculadas para un modelo de flujo?

Se necesitaría conocer cómo este testigo encaja en el marco geológico del modelo. Algunas preguntas que hacer: ¿Cuál es la escala del modelo en comparación con la escala del testigo? Este testigo sería razonablemente representativo de las unidades de flujo de unos pocos metros de espesor, pero no para unidades de decenas de metros de espesor. Los horizontes estratigráficos son horizontales, o ellos tienen un buzamiento medible? Si es así, es necesario aplicar una corrección por buzamiento como se vió en la Sección 5. Tener en cuenta que seguramente la geología varía tanto en la horizontal como en la vertical, por lo tanto, testigos adicionales serán necesarios para aplicar esta metodología con rigurosidad.

[Volver al Ejercicio 3](#) ↑

## 15 Acerca del Autor



**Dr. JP Brandenburg** es geólogo profesional en Haley & Aldrich donde lleva a cabo el modelado de agua subterránea para aplicaciones varias relacionadas al medio ambiente, minería y los recursos hídricos. Comenzó su carrera en geodinámica, en el área de los modelos numéricos, estudiando la convección viscosa en el manto terrestre en la Universidad de Michigan. Luego se unió a la organización de investigaciones de Royal Dutch Shell, desarrollando métodos para modelar la compleja geología estructural del subsuelo en yacimientos de hidrocarburos. Luego de varios años de desarrollar estas técnicas en el área de exploración y producción de Shell, el Dr. Brandenburg cambió su foco de interés hacia la industria medioambiental. Además de usar la modelación aplicada continúa, basándose en la experiencia interdisciplinaria, desarrollando nuevos métodos para capturar la heterogeneidad geológica del subsuelo. El Dr. Brandenburg tiene numerosas publicaciones en geodinámica, geología del petróleo, geología estructural y modelación numérica.

## 16 Acerca del Traductor



**Lic. Pabla Tognoli** es geóloga con posgrados en hidrogeología (Centro Internacional de Hidrología Subterránea, Barcelona, España - Instituto de Hidrología de Llanuras, Azul, Argentina) y medio ambiente (Universidad Nacional de Cuyo, Mendoza, Argentina). Hizo sus estudios de grado en la Universidad Nacional de La Plata, Argentina. Comenzó su carrera profesional trabajando en exploración minera de pórfidos de cobre y oro y en depósitos epitermales de oro y plata, especializándose en geoquímica. Posteriormente se dedicó a la exploración de minerales industriales como sales de potasio, boratos, trona y salmueras de litio. A

partir del trabajo en depósitos de salmueras comenzó su especialización en hidrogeología. En la actualidad trabaja en el sector público como hidrogeóloga en el equipo de agua subterránea del Departamento General de Irrigación en Mendoza, Argentina, realizando estudios hidrogeológicos de base enfocados en la de gestión hídrica; y en el ámbito privado se desempeña como geóloga-hidrogeóloga independiente realizando consultorías para distintas empresas.

Por favor, considere suscribirse a la lista de correo del GW-Project y mantenerse informado acerca de los nuevos lanzamientos de libros, eventos y formas de participar en el Proyecto. Cuando Ud. se suscribe en nuestro listado de correo electrónico nos está ayudando a construir una comunidad global de aguas subterráneas. [Registrarse](#)<sup>↗</sup>.



## Modificaciones a la Versión Original

### Cambios Generales:

Se eliminó la letra en negrita en las ecuaciones, excepto por la respuesta final en las soluciones del ejercicio.

Los enlaces externos en letra azul dentro del cuerpo del libro se cambiaron a letra negra.

Se agregó el símbolo de enlace externo luego de los enlaces en los que faltaba.

Se agregó el símbolo de enlace interno luego de los enlaces en los que faltaba.

Se eliminaron del panel de navegación los marcadores falsos.

### Cambios específicos:

página iii, Se agregó información de citas y el DOI del libro.

página 10, "20 por 20" fue cambiado a "50 por 50"

página 11, "20x20" fue cambiado a "50x50"

página 11, Se agregó un guión en el título de la Figura 7 entre las palabras: "Open" y "Source".

página 15, "20x20" fue cambiado a "50x50"

página 19, Se corrigió el denominador de la ecuación 4 para cambiar  $b_8/K_5$  a  $b_8/K_8$  e incluir el término adicional  $b_9/K_9$

página 23, Se eliminó un salto de línea erróneo de la última referencia.