

Estruturas Geológicas para Modelos de Fluxo de Água Subterrânea

J.P. Brandenburg

Tradutora: Thaís de Paula Marteleto

*Estruturas Geológicas
para Modelos de Fluxo
de Água Subterrânea*

The Groundwater Project

J.P. Brandenburg

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

*Tradutora: Thaís de Paula Marteleto
Geóloga, UNICAMP*

***Estruturas Geológicas para
Modelos de Fluxo de Água
Subterrânea***

*The Groundwater Project
Guelph, Ontario, Canada*

Todos os direitos reservados. Esta publicação é protegida por direitos autorais. Nenhuma parte deste livro pode ser reproduzida em qualquer forma ou por qualquer meio sem a permissão por escrito dos autores (para solicitar a permissão, entre em contato com: permissions@gw-project.org). A distribuição e reprodução comercial são estritamente proibidas.

Os trabalhos do GW-Project podem ser baixados gratuitamente em gw-project.org. Qualquer pessoa pode usar e compartilhar links do projeto gw-project.org para baixar seus materiais. Não é permitido disponibilizar documentos do GW-Project em outros sites, nem enviar cópias dos documentos diretamente para terceiros.

Copyright © 2020 J.P. Brandenburg (O 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

Tradução de Thaís de Paula Marteleto, 2021, 37 páginas.

ISBN: 978-1-77470-007-5

Inscreva-se na lista de e-mail do Groundwater Project e mantenha-se informado sobre o lançamento de novos livros, eventos e formas de como participar do Groundwater Project. Quando você se inscreve em nossa lista de e-mail, isso nos ajuda a construir uma comunidade global de águas subterrâneas. [Inscreva-se](#).

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



Editores principais: John Cherry e Eileen Poeter

Conselho: John Cherry, Paul Hsieh, Ineke Kalwij, Stephen Moran, Everton de Oliveira e Eileen Poeter

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

Imagem da Capa: J.P. Brandenburg, 2020

Tradução para o português: Thaís de Paula Marteleto

Conteúdos

CONTEÚDOS	IV
PREFÁCIO THE GROUNDWATER PROJECT	V
PREFÁCIO	VI
PREFÁCIO DA VERSÃO EM PORTUGUÊS	VII
PRÓLOGO	VIII
AGRADECIMENTOS	VIII
1 VISÃO GERAL	1
2 INTRODUÇÃO	2
3 CONTEXTO E PROPOSTA	3
3.1 MODELOS CONCEITUAIS	3
3.2 GEOLOGIA LOCAL	3
3.3 GEOLOGIA ESTRUTURAL	4
3.4 ESTRATIGRAFIA	4
4 CONSTRUINDO UMA ESTRUTURA	5
4.1 MAPAS E SEÇÕES TRANSVERSAIS	5
4.2 SUPERFÍCIES	6
4.3 GRADE	9
5 CALCULANDO PROPRIEDADES	11
5.1 ESPESSURA BRUTA	11
5.2 ESPESSURA LÍQUIDA	12
5.3 RAZÃO LÍQUIDA PARA BRUTA	13
5.4 PROPRIEDADES	14
6 O MODELO	16
7 CONSTRUINDO UM MODELO ESTÁTICO A PARTIR DO MAPEAMENTO DE FÁCIES	17
8 CONSTRUINDO UM MODELO ESTÁTICO A PARTIR DE PROPRIEDADES REFINADAS	18
9 CONSTRUINDO UM MODELO ESTÁTICO A PARTIR DE DADOS LITOLÓGICOS	19
10 RESUMO	20
11 REFERÊNCIAS	21
12 EXERCÍCIOS	22
<i>Exercício 1</i>	22
<i>Exercício 2</i>	22
<i>Exercício 3</i>	22
BOX 1 CRIANDO GRADE PARA DADOS ESPARSOS	23
13 SOLUÇÕES DOS EXERCÍCIOS	25
<i>Exercício 1 – Solução</i>	25
<i>Exercício 2 – Solução</i>	25
<i>Exercício 3 – Solução</i>	25
14 SOBRE O AUTOR	26
15 SOBRE A TRADUTORA	27

Prefácio The Groundwater Project

Os Membros e Parceiros da Água das Nações Unidas estabelecem seu tema anual com alguns anos de antecedência. O tema do Dia Mundial da Água em 22 de março de 2022 é “Águas subterrâneas: tornando o invisível visível”. Este tema é mais apropriado para a estreia dos primeiros livros Groundwater Project (GW-Project) em 2020, que têm o objetivo de tornar as águas subterrâneas visíveis.

O GW-Project, uma organização sem fins lucrativos registrada no Canadá em 2019, tem o compromisso de contribuir para o avanço na educação e traz uma nova abordagem para a criação e disseminação de conhecimento para compreensão e solução de problemas. O GW-Project opera o site <https://gw-project.org> como uma plataforma global para a democratização do conhecimento da água subterrânea e se baseia no princípio de que:

“O conhecimento deve ser gratuito e o melhor conhecimento deve ser o conhecimento disponibilizado livremente.” Anônimo

A missão do GW-Project é fornecer materiais educacionais acessíveis, estimulantes e de alta qualidade, gratuitamente online em vários idiomas, para todos que desejam aprender sobre a água subterrânea e entender como a água subterrânea se relaciona e sustenta os sistemas ecológicos e a humanidade. Este é um novo tipo de empreendimento educacional global, pois é baseado no voluntariado de profissionais de diferentes disciplinas e inclui acadêmicos, consultores e aposentados. O GW-Project envolve centenas de voluntários associados a mais de 200 organizações de mais de 14 países e seis continentes, com participação crescente.

O GW-Project é um empreendimento contínuo e continuará com centenas de livros sendo publicados online nos próximos anos, primeiro em inglês e depois em outros idiomas, para download onde quer que a Internet esteja disponível. As publicações do GW-Project também incluem materiais de apoio, como vídeos, palestras, demonstrações de laboratório e ferramentas de aprendizagem, além de fornecer, ou vincular a software de domínio público para várias aplicações de água subterrânea que apoiam o processo educacional.

O GW-Project é uma entidade viva, portanto as edições subsequentes dos livros serão publicadas de tempos em tempos. Os usuários são convidados a propor revisões.

Agradecemos por fazer parte da Comunidade do GW-Project. Esperamos ouvir de você sobre sua experiência com o uso dos livros e material relacionados. Aceitamos ideias e voluntários!

Comitê Diretor do The GW-Project

Novembro de 2020

Prefácio

A hidrogeologia aplicada requer a aplicação de modelos conceituais para representar as condições do fluxo da água subterrânea, que são fundamentais para resolver o desenvolvimento da água subterrânea e os problemas de contaminação. A compreensão das condições da água subterrânea começa com a compreensão da geologia e o uso dessas informações geológicas para estimar a condutividade hidráulica e a porosidade. Por sua vez, a distribuição de condutividade hidráulica e porosidade inferida de informações geológicas são usadas para criar representações hidrogeológicas de um sistema de fluxo de água subterrânea. Antes da década de 1970, essa conversão era realizada usando lápis e papel, mas agora é feita usando softwares. No entanto, para usar o software de forma eficaz, é essencial entender esse processo de conversão. Este livro: *Geologic Frameworks for Groundwater Flow Models* (Estruturas Geológicas para Modelos de Fluxo de Água Subterrânea – em português), de J.P. Brandenburg, é uma introdução ao processo de conversão que se tornou bem estabelecido na indústria do petróleo, mas ficou para trás na indústria da hidrogeologia. Os hidrogeologistas sabem que os modelos tridimensionais de fluxo numérico são essenciais, mas é a conversão dos dados geológicos para o modelo hidrogeológico que precisa de um reconhecimento mais claro. Esta conversão é conhecida como: ‘modelagem estática’, que é o precursor da ‘modelagem dinâmica’. A modelagem dinâmica se refere à modelagem de fluxo e transporte (ou seja, os aquíferos não se movem, portanto são estáticos, mas os fluidos estão em movimento, portanto são dinâmicos).

J.P. Brandenburg, autor deste livro, é excepcionalmente qualificado para a tarefa porque é extensivamente educado em geologia e fluxo de fluidos; realizou conversões para modelagem estática e dinâmica sofisticada na indústria do petróleo; e atualmente está focado em conversões para modelos tridimensionais complexos de águas subterrâneas.

John Cherry, Líder do The Groundwater Project
Guelph, Ontario, Canada, Novembro de 2020

Prefácio da versão em português

Ser voluntária do The Groundwater Project e ter a oportunidade de difundir o conhecimento das águas subterrâneas através da tradução deste livro é um prazer e um reconhecimento da importância deste assunto para todas as esferas da sociedade.

O conteúdo deste livro abrange um fluxo de trabalho de modelagem estática com etapas para construir um modelo conceitual para um local contaminado hipotético (o local de teste) abrangendo rochas sedimentares.

Este livro traz a reflexão de que apesar da disponibilidade de softwares muito sofisticados disponíveis atualmente, onde é possível construir um modelo hidrogeológico em três dimensões (3D) e estimar vários parâmetros de uma área de interesse, ainda o conhecimento básico de geologia e hidrogeologia são extremamente necessários para uma interpretação confiável e robusta destes modelos. Você pode começar com um simples esboço dos contornos estruturais e fatores relevantes da área de interesse e a partir dele transferir para um software. Neste livro você aprenderá como construir um modelo conceitual com transformação em um modelo numérico tridimensional (3D) e ao final aprender como o processo de uso da estrutura é usado para criar um modelo de fluxo.

Aproveitem o conteúdo do livro e boa jornada ao fascinante mundo das águas subterrâneas!!

Thaís de Paula Marteleto, geóloga, voluntária do The Groundwater Project
Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP, Campinas, Abril de 2021

Prólogo

Os modeladores de água subterrânea devem estar familiarizados e ter acesso a métodos sistemáticos para traduzir a geologia física do subsolo em uma representação numérica. Outros hidrogeologistas se beneficiarão com a compreensão do processo. Este livro apresenta técnicas para criar a estrutura geológica subjacente dos modelos de fluxo de água subterrânea. Ele é organizado em torno de um local hipotético com águas subterrâneas contaminadas, começando com uma discussão sobre coleta de dados e interpretação geológica, em seguida, investiga as etapas necessárias para construir um modelo numérico realista. O leitor descobrirá que muitos dos métodos e cálculos podem ser aplicados com ferramentas tão simples como papel e lápis. Links para recursos de computação disponíveis publicamente são fornecidos sempre que possível.

Agradecimentos

Agradeço às seguintes pessoas por suas análises completas e úteis e contribuições para este livro:

- ❖ John G. Solum, Exploração e Produção Internacional Shell;
- ❖ Steve Naruk, Professor Adjunto, Departamento de Ciências Atmosféricas e da Terra, Universidade de Houston; e,
- ❖ Murray Einarson, Técnico Especializado, Haley & Aldrich, Inc.

Agradeço as sugestões e contribuições de Eileen Poeter. Agradeço a supervisão de Amanda Sills e a edição de Elhana Dyck, ambas do The Groundwater Project, Guelph, Ontário, Canadá. Agradeço a Eileen Poeter (Escola de Minas do Colorado, Golden, Colorado, EUA) pela edição, edição do layout e produção deste livro. A figura da capa foi gerada usando o software Visual MODFLOW Flex da Waterloo Hydrogeologic. Agradeço à Thaís de Paula Marteleto pela tradução deste livro para o português.

1 Visão Geral

Um modelo de geologia de subsuperfície é necessário antes de simular o fluxo de água subterrânea. A indústria do petróleo teve procedimentos mais bem definidos para modelagem geológica do que a indústria de águas subterrâneas, portanto, o The Groundwater Project fornece este livro para revisar o processo básico de modelagem de subsuperfície, incluindo técnicas de uma perspectiva de água subterrânea e petróleo. Os interesses comerciais da indústria do petróleo estão voltadas para a simulação precisa do volume, fluxo e extração de fluidos do subsolo. As técnicas descritas neste livro, em particular os conceitos de *espessura líquida* (a espessura dos estratos de granulação mais grossa que suportam o fluxo de fluido) versus *espessura bruta* (a espessura vertical total entre as unidades delimitadoras), não são apenas importantes para a produção de petróleo, mas também relevantes para a simulação de fluxos de água subterrânea, que podem ser de interesse para modeladores de recursos hídricos que estão estimando o volume de armazenamento em aquíferos.

Os modelos numéricos construídos para simular o destino e o transporte do contaminante requerem um delineamento mais detalhado da geologia. Para tais aplicações, a distribuição de propriedades geológicas heterogêneas é necessária porque os contaminantes seguem caminhos preferenciais através de zonas de alta condutividade hidráulica conectadas e, muitos processos de destino e transporte dependem do intercâmbio de fluidos com química diferente entre zonas de condutividade hidráulica distinta.

As técnicas de modelagem apresentadas aqui referem-se apenas a aquíferos clásticos, que são compostos de sedimentos ou rochas sedimentares derivadas de intemperismo mecânico, basicamente alguma combinação de cascalho, areia, silte e argila. Eles podem ser não consolidados (grãos fracamente empacotados, não cimentados) ou consolidados (grãos fortemente empacotados, cimentados). Essas técnicas não se aplicam a rochas fraturadas, cársticas ou outros aquíferos onde a porosidade secundária é a via de fluxo dominante.

O software de água subterrânea [Visual MODFLOW FLEX](#) da Waterloo Hydrogeologic é usado neste livro. É um programa de software que facilita a modelagem de fluxo de água subterrânea com a ferramenta de simulação de fluxo de água subterrânea mais comumente usada: o código da USGS [MODFLOW code](#). Ele também tem a vantagem de compartilhar algumas similaridades com o software Petrel da Schlumberger, um padrão da indústria de petróleo e gás para modelagem geológica de subsuperfície. O software de modelagem geológica [RockWorks](#) também é usado neste livro, principalmente, para gerar uma distribuição de materiais geológicos aos quais podem ser atribuídas propriedades hidráulicas que são então convertidas em valores para uma grade de modelagem de água subterrânea, como aquela definida pelo MODFLOW.

2 Introdução

Os hidrogeólogos trabalham com outros geólogos e engenheiros para desenvolver uma estrutura que forneça a base para definir as propriedades de um modelo de fluxo de água subterrânea em um processo de duas etapas; ou seja, modelagem estática seguida por modelagem de fluxo de fluido dinâmico. As propriedades imutáveis da geologia são caracterizadas no modelo estático, enquanto o modelo dinâmico simula o fluxo e ajusta as propriedades hidráulicas se mudanças no sistema de fluxo alteram as propriedades.

Por exemplo, o declínio da pressão durante a extração de fluido faz com que os materiais geológicos se compactem, reduzindo a condutividade hidráulica e a porosidade (propriedades dinâmicas). Enquanto isso, a quantidade de areia em relação ao xisto no reservatório não mudará (uma propriedade estática). Um modelo estático é construído usando ferramentas geométricas e é usado para preencher um simulador de fluxo com propriedades hidráulicas. Um modelo dinâmico é construído usando um simulador de fluxo (para águas subterrâneas, MODFLOW é comumente utilizado) e é usado para ajustar as propriedades hidráulicas combinando a simulação com dados medidos em campo para que o simulador preveja razoavelmente mudanças no sistema de fluxo em resposta a tensões. Tradicionalmente, o modelo estático era desenvolvido por geólogos e depois entregue aos engenheiros para simulação dinâmica. No entanto, a experiência tem mostrado que este processo unilateral tem algumas limitações, pois a calibração do modelo dinâmico pode fornecer uma visão adicional da geologia e a compreensão da geologia pode restringir os parâmetros necessários para a calibração. Hoje, o processo tende a ser mais iterativo. Na indústria de águas subterrâneas, o modelador geralmente é hábil em matemática, engenharia e geologia, ou um grupo de especialistas trabalha em conjunto para desenvolver o modelo.

A construção de modelos de água subterrânea tende a ser um processo geograficamente intensivo, com atenção aos detalhes de visualização do mapa e simplificação da subsuperfície em uma série de aquíferos ou unidades de fluxo hidroestratigráfico. Esta é certamente a abordagem mais apropriada para modelagem em escala regional ou de bacias hidrográficas, e muitas ferramentas SIG sofisticadas estão disponíveis para esse trabalho. No entanto, essas ferramentas e métodos podem ser complicados ao lidar com modelos em escala local, que podem ter uma área de apenas alguns milhares ou centenas de metros quadrados.

Este livro se concentra na construção de modelos de água subterrânea em escala de um local contaminado usando conceitos de fluxo de trabalho empregados para modelagem estática de reservatórios de petróleo. Nenhum software específico é recomendado, pois grande parte do trabalho pode ser feito com papel e lápis ou software genérico de contorno. Muitos dos conceitos básicos são anteriores aos computadores modernos com capacidade gráfica e não mudaram com o desenvolvimento de softwares.

O fluxo de trabalho de modelagem estática é apresentado aqui como uma série de etapas para construir um modelo para um local contaminado hipotético (o local de teste). Isso começa com os exercícios necessários para construir um modelo conceitual útil, passa para as técnicas para transformar o modelo conceitual em um modelo numérico tridimensional (3D) e culmina no processo de uso da estrutura para criar um modelo de fluxo.

3 Contexto e Proposta

Antes de iniciar qualquer projeto de modelagem, os objetivos do projeto devem ser claramente definidos. Avaliações úteis de fluxo e transporte podem ser realizadas usando modelos analíticos, geralmente por meio de uma planilha. É uma boa prática começar com lápis e papel e ver quantas perguntas podem ser respondidas antes de construir um modelo numérico complicado. Além disso, cálculos cuidadosos fornecem uma linha de base para avaliar a funcionalidade básica de modelos futuros mais complexos.

3.1 Modelos Conceituais

A maioria dos projetos ambientais para áreas de águas subterrâneas contaminadas deve preparar um modelo conceitual para cumprir as regulamentações governamentais. O modelo conceitual define detalhes básicos do aquífero contaminado; sua geometria, profundidade, espessura, gama de condutividades hidráulicas, cargas hidráulicas observadas e características do sistema que influenciam o comportamento hidráulico, como corpos d'água superficiais e poços de bombeamento. Para locais contaminados menores, é provável que os detalhes do modelo conceitual sejam adequados para atender aos requisitos regulatórios, mas não fornecem detalhes suficientes para que a modelagem preveja efetivamente o comportamento do sistema e, assim, projete o plano de remediação. Modelos conceituais que descrevem camadas espessas com propriedades homogêneas são um indicador de que uma revisão mais completa pode melhorar o modelo.

3.2 Geologia Local

A familiaridade com a geologia local é uma necessidade para qualquer modelagem de subsuperfície. Os furos para poços de abastecimento de água, investigação geotécnica e outras aplicações são abundantes, muitas vezes com registros disponíveis publicamente e interpretações publicadas. É útil revisar relatórios de outros projetos de água subterrânea na área para coletar informações sobre as propriedades e condições do subsolo e aprender com os problemas encontrados por outros que realizam um trabalho semelhante.

3.3 Geologia Estrutural

Os dados necessários para identificar características geológicas estruturais são essenciais, mas não suficientes para muitos locais contaminados. Conseqüentemente, as falhas podem não ser identificadas, e a superfície da base do terreno é frequentemente caracterizada como uma superfície plana monotônica ou profundidade típica, enquanto na realidade pode ter uma topografia complexa. A superfície rochosa é extremamente importante em locais com contaminantes de fase líquida não aquosa densa (DNAPL) porque o DNAPL afunda em camadas de baixa permeabilidade e a migração posterior é controlada pela topografia da superfície. As falhas podem ser encontradas virtualmente em todo o mundo. Por exemplo, áreas da Costa do Golfo do Texas são afetadas pela deformação da superfície relacionada a falhas de deslizamento, embora essa parte da América do Norte seja tectonicamente silenciosa. Frequentemente, pequenas falhas são identificadas em locais contaminados observando-se os locais de gradientes hidráulicos mais íngremes. O exemplo de local de teste apresentado neste livro contém uma pequena falha normal.

3.4 Estratigrafia

A escassez de dados em locais contaminados também apresenta desafios para delinear a estratigrafia. No entanto, mais dados estratigráficos foram coletados nos últimos anos, pois muitas vezes a complexidade estratigráfica está provando ser um fator chave limitante para uma remediação bem sucedida. Os métodos de remediação que envolvem a extração e injeção de água subterrânea podem ser limitados pela deflexão do fluxo por barreiras estratigráficas de baixa permeabilidade. Camadas finas de solos de grãos finos ricos em argila e matéria orgânica podem ter uma alta capacidade de reter contaminantes do lençol freático. Depois que as porções mais permeáveis do aquífero foram remediadas, esses contaminantes podem se difundir de volta para as águas subterrâneas limpas, causando uma recuperação inesperada nas concentrações. Camadas como essa podem ser facilmente perdidas usando tecnologias mais antigas, como trado e perfuração rotativa. A perfilagem de poços e as ferramentas de detecção direta de alta resolução podem ser usadas para criar perfis com o nível de detalhe necessário. No entanto, os princípios estratigráficos são necessários para fazer uma determinação significativa de como esses detalhes se estendem para o espaço entre os furos. Documentos de orientação, como Schultz *et al.* (2017) contêm informações detalhadas e fluxos de trabalho sobre como fazer tais avaliações estratigráficas.

Para reservatórios de petróleo e gás, muitas caracterizações são feitas considerando e comparando fácies deposicionais sedimentares (Shepherd, 2009). Por exemplo, a relativa homogeneidade da fácies eólica (duna de areia) leva a uma melhor conectividade do reservatório do que a natureza em camadas e altamente dissecada de turbiditos canalizados em águas profundas. Este tópico é digno de seu próprio livro-texto e não é discutido aqui,

exceto para dizer que projetos ambientais podem se beneficiar da mesma linha de investigação. Mais uma vez, os locais de águas subterrâneas contaminadas são frequentemente de extensão limitada ou o financiamento para coletar os dados necessários é insuficiente, tornando essa análise estratigráfica impossível.

4 Construindo uma Estrutura

A estrutura geométrica é a base para a modelagem estática. Isso orienta o local contaminado em três dimensões em relação à definição dos furos de sondagem.

4.1 Mapas e Seções Transversais

Por muitos anos, mapas e seções transversais formaram toda a estrutura para modelagem estática. Com softwares modernos, isso agora é feito em ambientes 3D imersivos que facilitam a conceituação espacial. No entanto, mapas e seções transversais ainda sustentam as interpretações 3D de muitas maneiras. Para este exemplo, mapas tradicionais e seções transversais são usados para a interpretação.

O local de teste tem aproximadamente 9 hectares e foi caracterizado por 14 furos. Os furos são dispostos em dois transectos aproximadamente perpendiculares e foram perfurados através de sedimentos não consolidados e terminados no topo da rocha. A superfície do solo está entre 70-73 metros acima do nível do mar e inclina-se para o sul. O leito rochoso foi encontrado em profundidades que variam de 40 a 70 metros abaixo da superfície do solo. Os detalhes geométricos usados para construir a estrutura de interpretação são mostrados na Figura 1, onde as duas seções transversais foram dispostas imediatamente ao lado do mapa, com o desenho em escala.

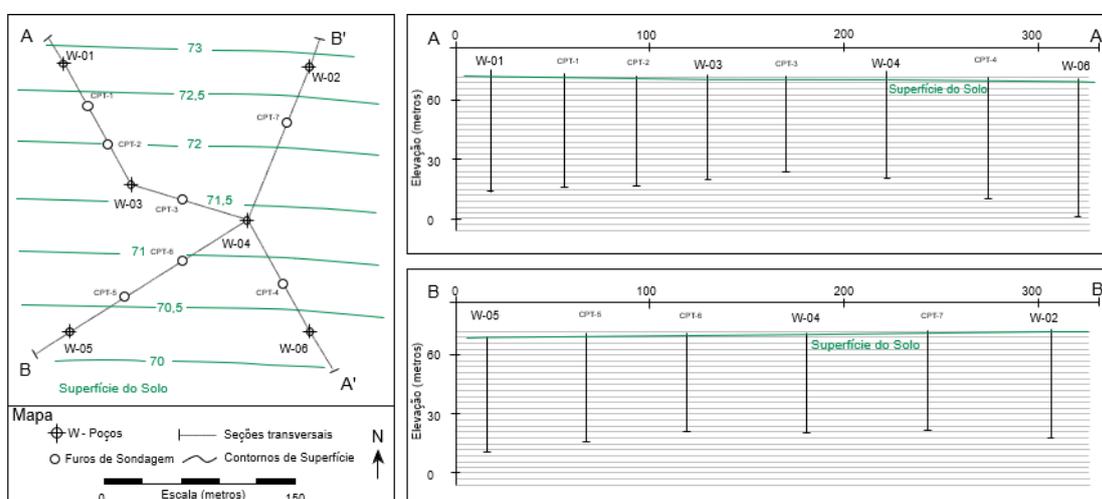


Figura 1 – A estrutura de interpretação (Brandenburg, 2020).

4.2 Superfícies

A interpretação geológica envolve a divisão da subsuperfície em camadas. Estudiosos da estratigrafia estão interessados em horizontes e zonas que representam tempos geológicos específicos, geólogos estruturais tentam identificar superfícies que eram originalmente horizontais e geofísicos procuram camadas de rocha com propriedades acústicas contrastantes. Não importa o objetivo, construir superfícies tridimensionais é uma parte essencial da modelagem geológica de subsuperfície. A maneira mais robusta de fazer isso é contornar os dados definindo a superfície de interesse, criando contornos estruturais: mapas com linhas de igual elevação definindo a superfície geológica de interesse. Os mapas de contorno estrutural são análogos aos mapas de contorno topográfico.

Contornar manualmente (Figura 2) em vez de depender de um algoritmo de computador tem o benefício de incorporar a compreensão humana das características geológicas típicas, enquanto o software não tem o benefício do bom senso em áreas de dados esparsos. Mapas contornados à mão são úteis como controle de qualidade em contornos gerados usando software de computador, especialmente para superfícies que são descontínuas devido a falhas.



Figura 2 - Desenhar contornos estruturais à mão é um método confiável para interpretação geológica (Brandenburg, 2020).

No local de teste, registros litológicos detalhados foram gerados para cada poço usando uma combinação de amostras coletadas durante a perfuração e aquelas coletadas por dispositivos de detecção de poço (Figura 3). Aqui, os registros litológicos foram gerados usando um Teste de Cone de Penetração (CPT: *Cone Penetrometer Test*): um método de detecção direta de mudanças nas propriedades mecânicas dos materiais não consolidados durante a perfuração. O CPT é comumente empregado para investigações ambientais e tem

o benefício de produzir registros em intervalos discretos, em vez de uma curva contínua. Para o local de teste, os registros litológicos discretos diferenciam entre rocha e seis classes de argila, silte, areia e cascalho.

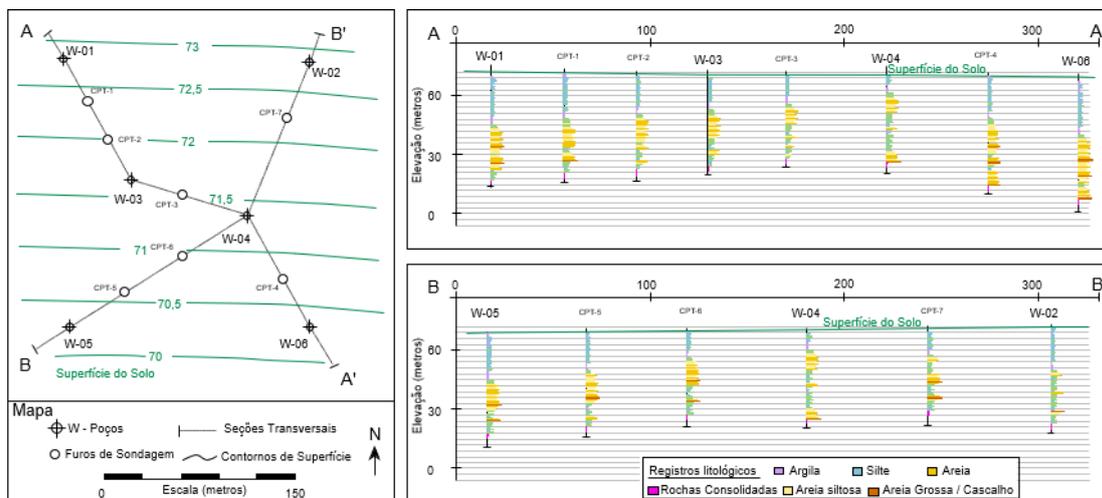


Figura 3 - Registros litológicos discretos no local de teste. Os contornos da superfície mostram a elevação da superfície do solo acima do nível do mar (Brandenburg, 2020).

A análise dos registros revela sedimentos ascendentes afinando sobre um leito rochoso. As principais superfícies identificadas são o topo da rocha-mãe e uma camada de argila lateralmente contínua separando os estratos mais grossos dos estratos mais rasos contendo silte e argila. Com base em condições ligeiramente artesianas observadas na instalação dos poços de monitoramento, a camada de argila se comporta como um aquífero com vazamentos. Isso é mapeado como horizonte estratigráfico H01, conforme mostrado na Figura 4. Com base na familiaridade com locais semelhantes na região, o horizonte é mapeado como um anticlinal aproximadamente simétrico.

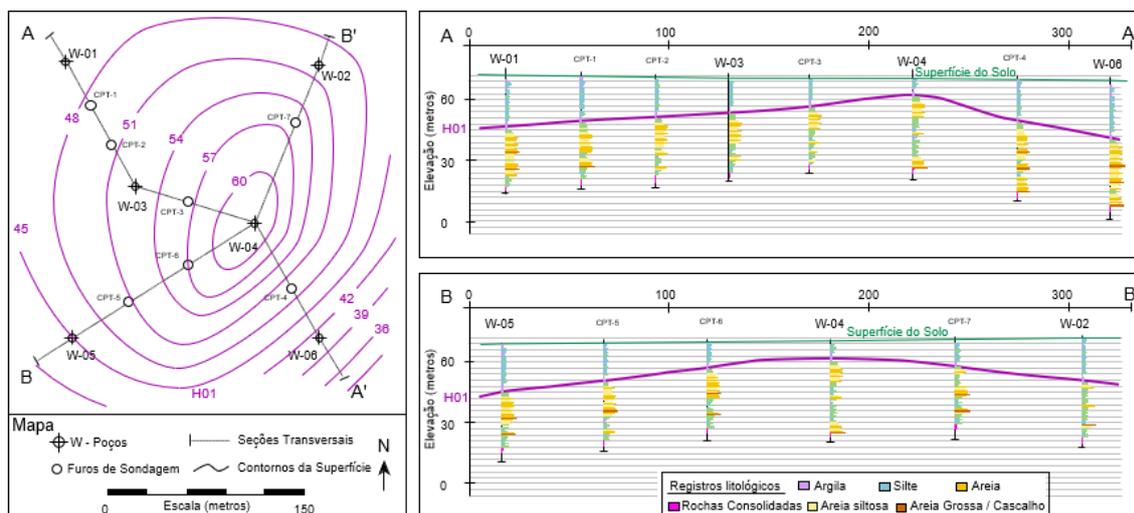


Figura 4 - Horizonte estratigráfico H01. Os contornos da superfície mostram a elevação do horizonte estratigráfico H01 acima do nível do mar (Brandenburg, 2020).

O leito rochoso neste local é conhecido por ter falhas normais de tendência nordeste-sudoeste. A escarpa foi identificada por uma unidade de granulação grossa presente na base do poço W-04, mas não observada em outros poços. A espessura do intervalo estratigráfico entre H01 e embasamento rochoso é mais espessa nos poços W-04, CPT - 7 e W-02 em comparação com a espessura nos poços CPT-6, CPT-5 e W-05. Isso indica que a falha é uma falha de crescimento que muito provavelmente não atinge o nível H01. Isso resulta na necessidade de um deslocamento na superfície rochosa no mapa de contorno mostrado na Figura 5.

Este tipo de pequena escarpa de falha enterrada é comum, particularmente em áreas tectonicamente ativas, como o oeste dos Estados Unidos. A interpretação de falhas em furos de sondagem é outro tópico rico além do escopo deste livro. No local de teste, a falha é importante porque a seção arenosa é mais espessa e mais grossa no lado descendente da falha. Se esta característica fosse importante para o projeto (por exemplo, se houvesse contaminação por DNAPL), métodos geofísicos que são sensíveis à profundidade da interface sedimento / rocha-mãe poderiam ser empregados.

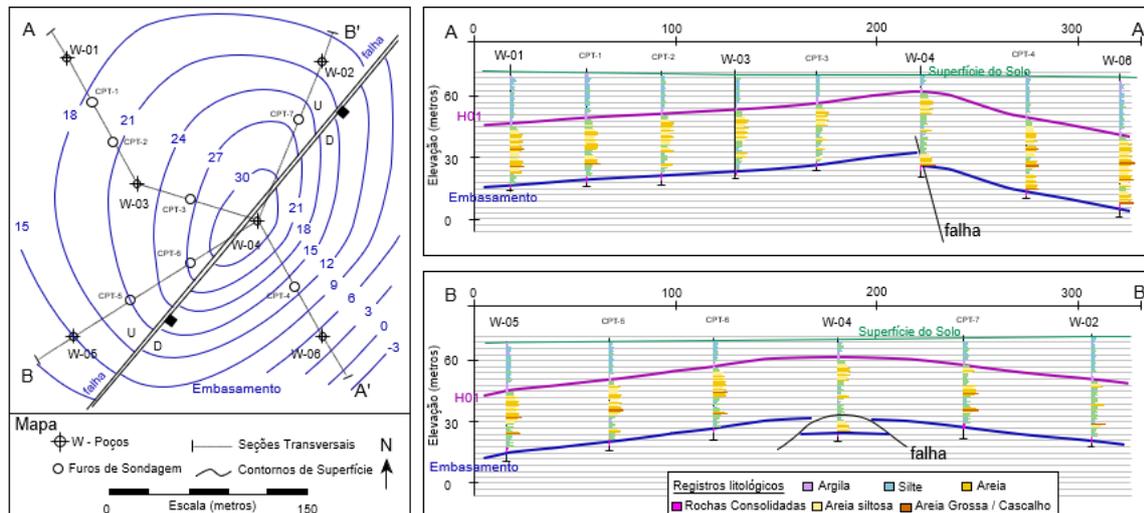


Figura 5 - A superfície estruturada que define o topo da rocha. Os contornos da superfície mostram a elevação do topo do leito rochoso (embasamento) acima do nível do mar. Os contornos são descontínuos em toda a falha (Brandenburg, 2020, gw-project.org)

Na indústria do petróleo, os modelos estáticos são focados na porção do reservatório com fluidos móveis. Neste exemplo de local de teste, a seção de interesse são os estratos de granulação grossa entre o topo da rocha e H01. Na avaliação de óleo e gás, o volume de rocha limitado entre essas superfícies seria denominado reservatório. Aqui, é o aquífero. Em alguns projetos de água subterrânea, a natureza do material de granulação fina é importante para caracterizar sua capacidade de armazenar ou liberar água, ou sua química e potencial para transferir constituintes químicos por difusão.

4.3 Grade

Em seguida, as superfícies definidas ao longo das seções transversais são estendidas usando uma técnica de interpolação (conhecida como grade) para definir uma vista plana bidimensional de sua elevação. Isso fornece uma elevação para cada superfície de interesse em intervalos regulares da grade em todo o site e é necessária para simulações tridimensionais. O método mais simples de construção de grade é usar observações pontuais, como a elevação de um estrato em poços específicos, como entrada direta para algoritmos de grade, o que pode ser feito em programas comerciais como [EVS](#) ou [Surfer](#). Esses programas destinam-se principalmente à visualização de dados, mas também podem ser usados para preparar superfícies em grade para modelos.

A qualidade dos dados de entrada é muito importante para este processo. O conjunto de dados ideal contém pontos que são espaçados uniformemente, cobrem toda a área que será quadriculada e foram revisados para inconsistências e validados. Dado esse conjunto de dados, a maioria dos algoritmos produzirá a mesma superfície em grade. O uso de dados esparsos, com espaçamento irregular e inconsistentes internamente é uma

das principais fontes de erro na modelagem geológica. A saída de diferentes algoritmos de grade pode variar drasticamente na resposta a dados inconsistentes e dados discrepantes. Alguns artefatos de grade comuns são alvos em torno de pontos e superfícies de dados únicos que se estendem significativamente além dos limites dos dados originais ([Veja exemplos no Box 1](#)).

Em situações com dados esparsos ou irregulares, um método sistemático e idealmente baseado em geologia é necessário para guiar o algoritmo de grade neste “espaço em branco” entre as observações. Softwares disponíveis para este tipo de modelagem geológica 3D são, por exemplo, [Visual MODFLOW Flex](#) e [RockWorks](#). Para o local de teste, o método usado é o de digitalização de contornos desenhados à mão para criar pontos de dados adicionais para o algoritmo de grade, ou seja, é um método relativamente simples, uma vez que não requer nenhum software especial (Figura 6).

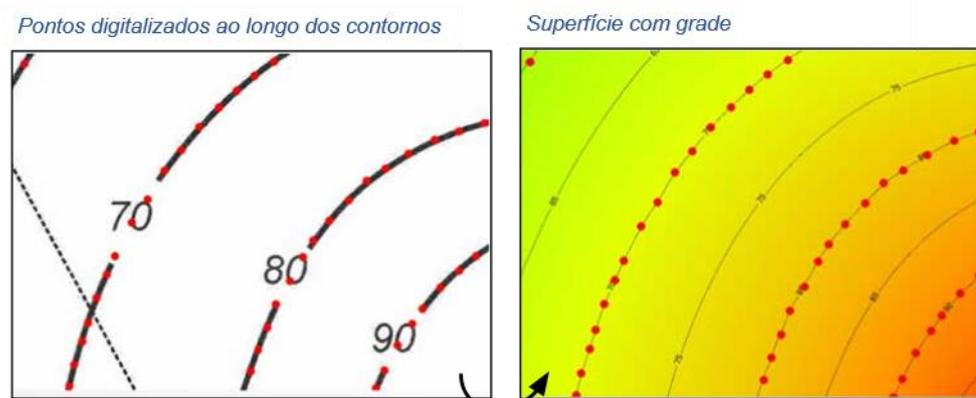


Figura 6 - Os algoritmos de grade precisam de orientação em áreas com dados esparsos. Aqui, os contornos desenhados à mão são digitalizados para fornecer dados ao algoritmo de grade (Brandenburg, 2020).

No modelo de local de teste, os dados contornados à mão foram digitalizados e depois colocados em grade com discretização de nós com grade de 20 por 20 (células de grade têm aproximadamente 15 metros por 15 metros). Esta 'grade 20x20' é usada nos cálculos em todo o livro a partir de agora.

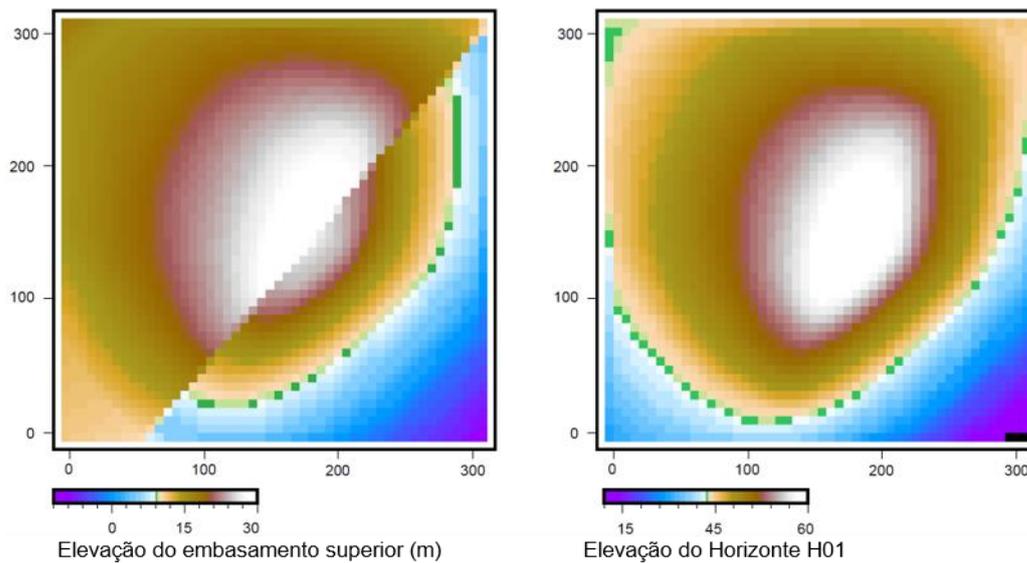


Figura 7 – Superfícies com grade para o embasamento superior (esquerda) e H01 (direita). Cada quadrado é um valor interpolado da elevação da superfície com sua magnitude indicada pela cor do quadrado. Traçado com as ferramentas de mapeamento genérico de código aberto (*Generic Mapping Tools* - [GMT](#)) (Brandenburg, 2020).

5 Calculando Propriedades

Uma vez que a estrutura tridimensional é definida e quadriculada, a próxima etapa é preencher a grade com os valores de propriedade hidráulica necessários para a simulação.

5.1 Espessura Bruta

A propriedade mais simples é a espessura do reservatório ou aquífero, que é a distância vertical entre as superfícies delimitadoras (Figura 8).

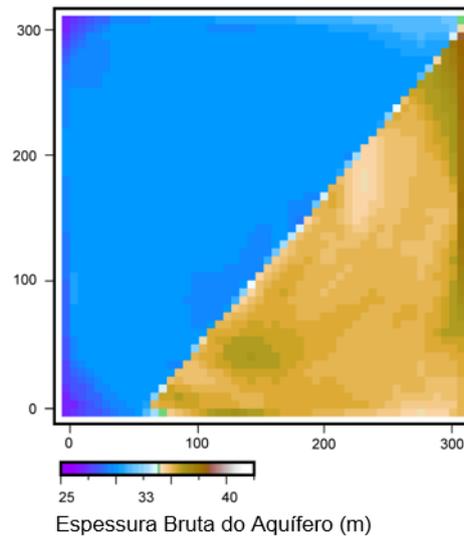


Figura 8 - A espessura do aquífero reticular é a diferença entre a grade para HO1 e a superfície rochosa (Brandenburg, 2020).

Para estratos dobrados ou imersos, pode ser necessário aplicar uma correção trigonométrica de mergulho (Figura 9). No exemplo do local de teste, a deformação estrutural é relativamente pequena, portanto, nenhuma correção de mergulho é aplicada.

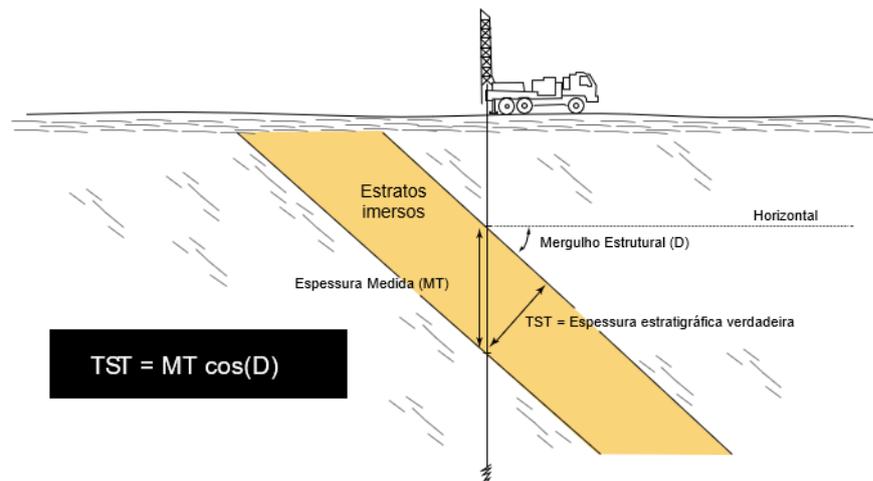


Figura 9 - Cálculo da espessura estratigráfica verdadeira (TST) a partir da medição da espessura (MT) de um estrato imerso do poço (Brandenburg, 2020).

5.2 Espessura Líquida

Argilas e rochas relacionadas, como xisto, têm porosidade volumetricamente grande, mas desconectada, e representam um volume do aquífero que não está envolvido no fluxo ativo, o que é importante na avaliação de locais de contaminação de águas subterrâneas (Payne *et al.*, 2008). A porção que flui do reservatório ou aquífero é identificada como “seção líquida”. Para determinar isso, um valor de corte baseado na granulometria é selecionado e os registros geológicos são “bloqueados” em zonas líquidas

(sedimentos grossos) e não-líquidas (sedimentos finos). A espessura da seção da rede é calculada para cada registro e, em seguida, usada para criar contornos de espessura da rede, conforme mostrado na Figura 10. Nesse caso, o mapa é uma isópaca onde os isocontornos representam linhas de espessura constante em vez de elevação constante.

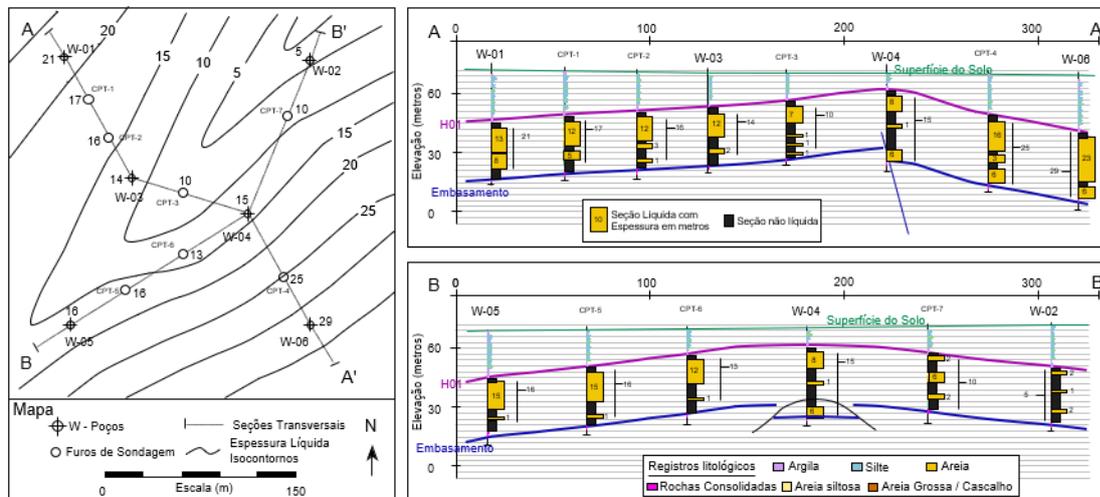


Figura 10 - Quantificando a espessura da rede com registros bloqueados e um mapa de isópaca (Brandenburg, 2020).

Os contornos de espessura são então reticulados usando o mesmo processo dos horizontes nas etapas anteriores (Figura 11).

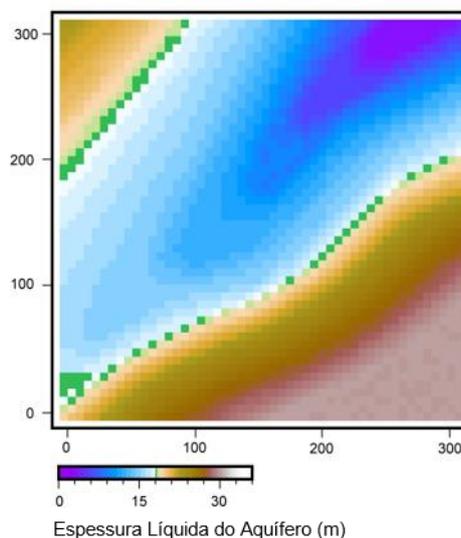


Figura 11 - Mapa de espessura de rede com grade (Brandenburg, 2020, gw-project.org)

5.3 Razão Líquida para Bruta

Uma vez que os dados de espessura líquida e bruta tenham sido mapeados e colocados em grade, é simples calcular a proporção das duas. A espessura líquida dividida

pela espessura total é a relação entre as espessuras líquidas e brutas, um valor entre 0 e 1 que geralmente é referido apenas como líquido para bruto (Figura 12). Independentemente da fácies sedimentar, camadas com alto valor da razão líquida para bruta tendem a se mostrar permeáveis e hidraulicamente bem conectadas. Embora as camadas de baixo valor líquido a bruto possam ser permeáveis em poços individuais, é muito mais provável que se quebrem em compartimentos desconectados.

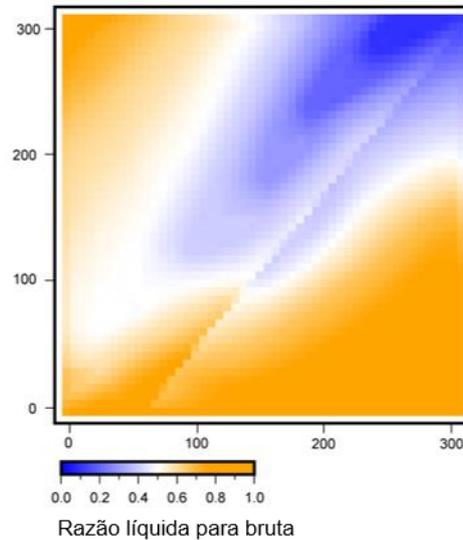


Figura 12 – Razão líquida para bruta em grade (Brandenburg, 2020).

5.4 Propriedades

Na avaliação de reservatórios de petróleo e gás, a relação entre a espessura líquida e a espessura bruta em reservatórios clásticos é conhecida há muito por se correlacionar de forma confiável com várias propriedades do reservatório total. A porosidade e a permeabilidade são frequentemente mapeadas diretamente do valor líquido para o bruto usando funções de interpolação exclusivas para um campo de petróleo específico. No local de teste, a porosidade e a condutividade hidráulica são estimadas com base na correlação entre a razão líquida e bruta e as medições de porosidade e condutividade hidráulica feitas nos poços de monitoramento permanentes, conforme mostrado na Figura 13.

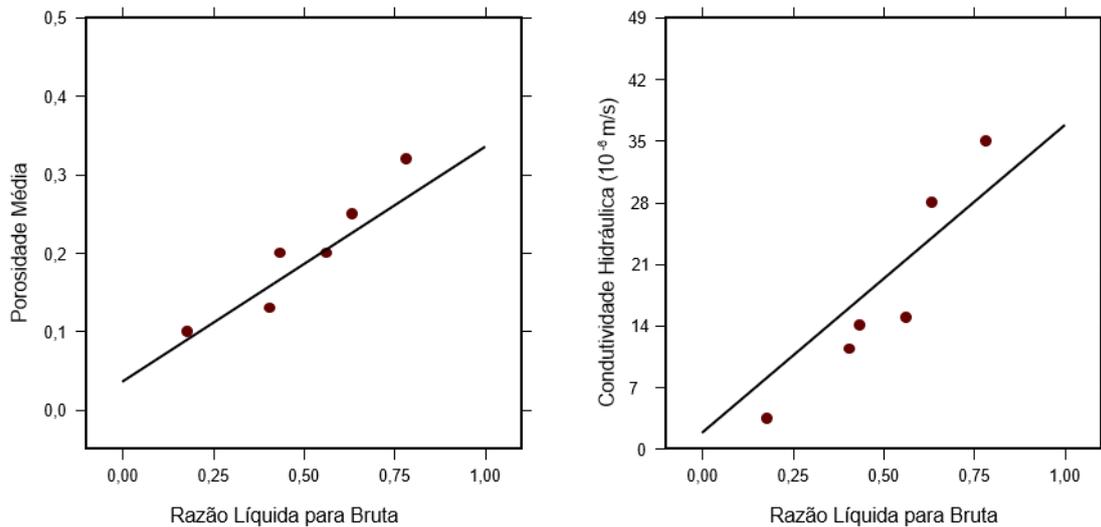


Figura 13 - Relação entre a razão líquida e bruta de cada poço e as medições de porosidade e condutividade hidráulica feitas no poço (Brandenburg, 2020).

As equações para as retas na Figura 13 são as Equações 1 e 2, respectivamente, em que L = Líquida e B = Bruta:

$$\text{Porosidade} = \phi = 0,3 \left[\frac{L}{B} \right] + 0,035 \quad (1)$$

$$\text{Condutividade Hidráulica} = K = (35 \times 10^{-6}) \left[\frac{L}{B} \right] + (1,8 \times 10^{-6}) \quad (2)$$

Uma vez que essas relações específicas do aquífero tenham sido estabelecidas, elas podem ser calculadas para cada localização da grade dado seu valor líquido para bruto para criar propriedades do aquífero para cada célula da grade 20x20 (Figura 14).

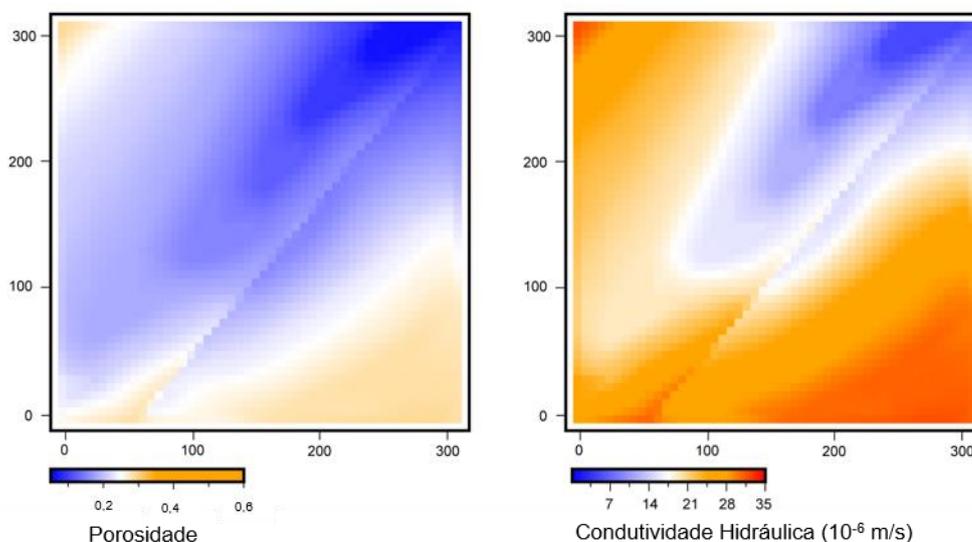


Figura 14 – Grade de porosidade e condutividade hidráulica calculada a partir das Equações 1 e 2 (Brandenburg, 2020)

6 O Modelo

O modelo mostrado na Figura 15 foi montado usando Visual MODFLOW FLEX, com a grade preenchida usando as relações de porosidade e condutividade hidráulica da seção anterior.

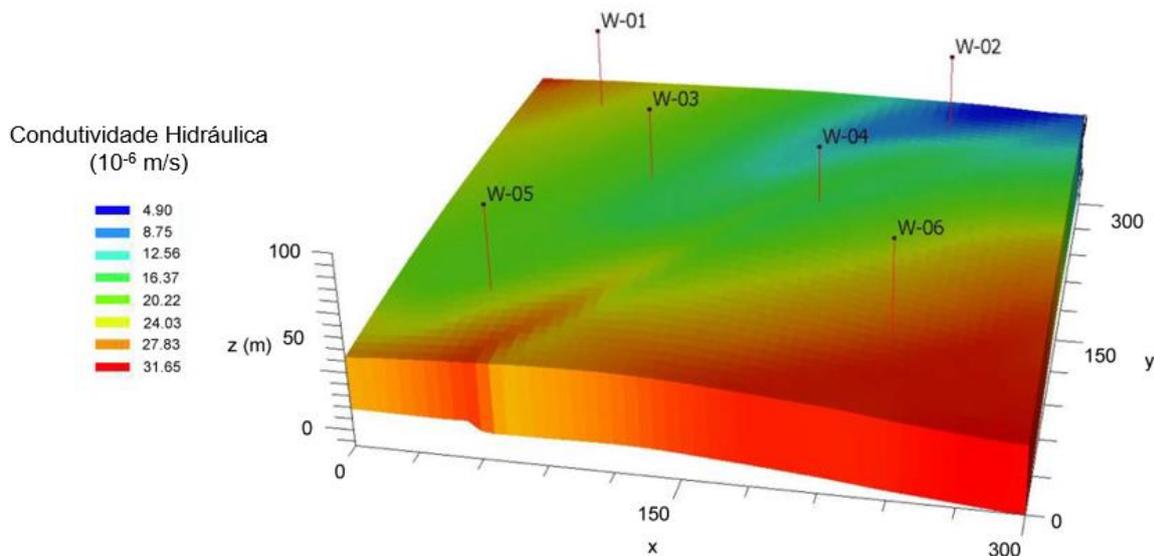


Figura 15 - Condutividade hidráulica mapeada para a grade do modelo tridimensional no Visual MODFLOW FLEX (Brandenburg, 2020).

Neste ponto, o modelo está pronto para ser usado em simulações dinâmicas. No entanto, este modelo é apresentado para ilustrar princípios de delineamento de subsuperfície a partir de dados de poço. Ele representa o local como uma única camada, enquanto os modelos de água subterrânea normalmente requerem várias camadas para representar sistemas de água subterrânea com vários aquíferos, recursos de engenharia dentro de um sistema de água subterrânea e/ou heterogeneidade geológica complexa, especialmente quando o transporte de contaminantes ou remediação é simulado.

Para um modelo multicamadas, horizontes estratigráficos podem ser modelados usando os mesmos métodos descritos neste livro. Métodos geoestatísticos também podem ser aplicados; por exemplo, a maioria dos softwares de pré-processamento de modelagem de águas subterrâneas permite que propriedades como a condutividade hidráulica sejam interpoladas entre os valores observados usando um algoritmo geoestatístico, como Krigagem.

7 Construindo um Modelo Estático a partir do Mapeamento de Fácies

Um método frequentemente usado para capturar heterogeneidade em modelos estáticos de petróleo é o mapeamento de fácies. As fácies geológicas são assembleias de rochas, sedimentos ou solos com uma origem e história geológica comuns que, neste contexto, conduziriam a um comportamento hidrológico semelhante. Por exemplo, em um sistema fluvial, os sedimentos da planície de inundação tenderiam a ter camadas com lamas abundantes de granulação fina, criando baixa condutividade hidráulica e razão de conectividade vertical para horizontal muito menor do que 1. Por outro lado, um depósito em barra de pontal formado por cascalho teria uma alta condutividade hidráulica com a razão de condutividade vertical para hidráulica mais próxima de 1. No mapeamento de fácies, cada célula da grade recebe um código de fácies, que é então “mapeado” para um conjunto correspondente de parâmetros hidráulicos (Figura 16).

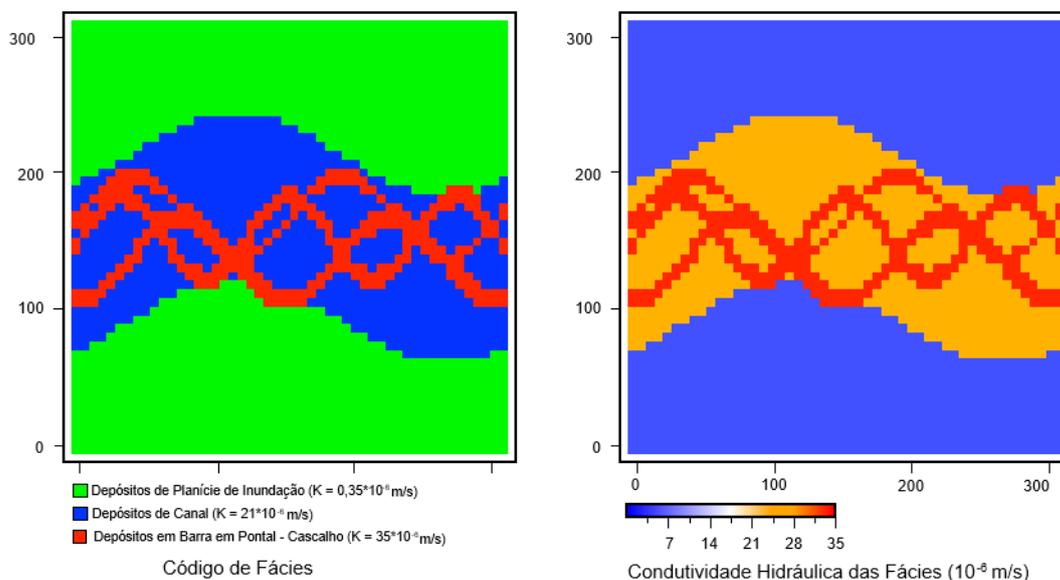


Figura 16 - Propriedades de condutividade hidráulica do mapeamento de fácies (Brandenburg, 2020).

As fácies são conhecidas apenas na localização dos furos; outras partes devem ser atribuídas por algum processo. No cenário mais simples, isso é atribuído com base na intuição do modelador. No entanto, muitos mapas de fácies diferentes, mas igualmente válidos, podem ser desenvolvidos. Esta é a base para modelos geoestatísticos mais avançados que, simultaneamente, respeitam as restrições estatísticas e os princípios geológicos. Alguns desses modelos são muito complexos e representam os tipos de heterogeneidade observados em afloramentos rochosos cuidadosamente medidos e outros estudos geológicos em uma escala muito mais precisa que a resolução da grade do modelo de fluxo. Usar isso como base para um modelo de fluxo requer uma técnica de aumento de

escala quantitativa para garantir que as propriedades de fluxo em escala fina sejam retidas na grade menos refinada.

8 Construindo um Modelo Estático a partir de Propriedades Refinadas

Uma metodologia mais direta, mas também trabalhosa, é preencher o modelo usando propriedades hidráulicas "refinadas" a partir dos melhores dados de escala disponíveis. Se os testemunhos forem coletados de um furo de sondagem, amostras não perturbadas de solo ou rocha podem ser enviadas a um laboratório para testes de porosidade e condutividade hidráulica. Isso permite a correlação entre a litologia e as propriedades hidráulicas na escala de polegadas. Um volume representativo é então construído com um esquema de camadas seguindo os principais tipos de litologia no núcleo. Cada camada é atribuída a uma condutividade hidráulica "combinada" que representa uma média estatística das medições de laboratório para aquela litologia. Essas camadas são então convertidas em uma condutividade hidráulica vertical (K_v) e horizontal (K_h) (Figura 17).

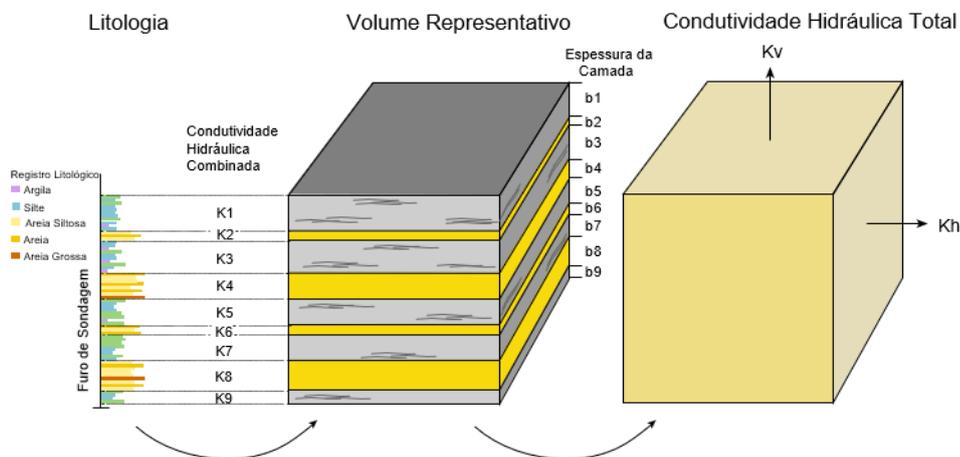


Figura 17 - Refinamento de profundidade discreta da litologia para condutividade hidráulica total (Brandenburg, 2020).

A condutividade hidráulica horizontal é calculada como a média aritmética das camadas combinadas, como mostrado na Equação 3 para o exemplo na Figura 17.

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

A porosidade aparente também é calculada como uma média aritmética. A condutividade hidráulica vertical é calculada como a média harmônica das camadas combinadas, conforme mostrado na Equação 4 para o exemplo na Figura 17.

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

Em geral, a média harmônica é representativa de K para camadas perpendiculares à direção do fluxo, enquanto a média aritmética representa K para camadas paralelas ao fluxo. Embora esta abordagem seja precisa em um volume imediatamente ao redor do poço, algum método sistemático ainda é necessário para estender esses resultados para o resto do volume do modelo. Na prática, isso geralmente é feito combinando-se o aumento da escala com métodos de modelagem estocástica.

9 Construindo um Modelo Estático a partir de Dados Litológicos

Quando dados geológicos suficientes estão disponíveis para definir uma estrutura de modelagem de água subterrânea, software de modelagem como o [RockWorks](#) pode ser usado para criar uma grade de tipos litológicos em todo o domínio do modelo, com propriedades hidráulicas atribuídas a cada tipo litológico (Figura 18). [Uma animação do modelo pode ser visualizada neste vídeo](#). A animação de 35 segundos (~ 80Mb) gira a bacia no espaço tridimensional enquanto mostra: a superfície rochosa; os registros litológicos usados para determinar a distribuição litológica; diagramas de cerca ao longo de algumas seções transversais; e o modelo sólido final cortado sequencialmente de oeste para leste e vice-versa, depois do sul para o norte e vice-versa. Materiais de granulação fina são exibidos em roxo, granulação média em amarelo e granulação grossa em laranja com falhas em rosa.

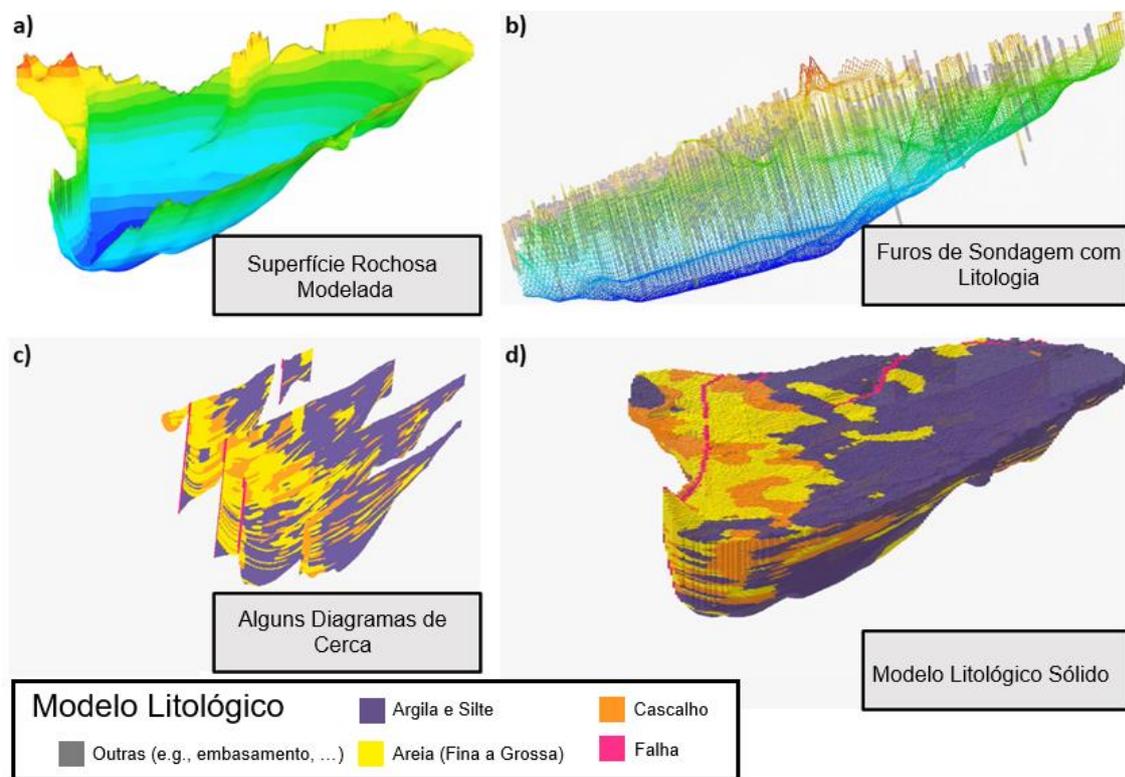


Figura 18 - Modelo litológico a partir de **a)** definição da superfície rochosa; **b)** definição dos tipos litológicos em cada furo; **c)** alguns diagramas de cerca após a interpolação e extrapolação dos tipos litológicos entre os poços; e **d)** o modelo litológico sólido completo. Imagens fornecidas pelo software RockWare (2020).

10 Resumo

Os conceitos de modelagem de subsuperfície neste livro foram apresentados no contexto do fluxo de trabalho de modelo estático para dinâmico. Cada projeto de água subterrânea é único e tais fluxos de trabalho devem ser vistos mais como uma recomendação de estrutura organizacional, em vez de um estrito procedimento. A dispersão típica das restrições de dados no nível de um local ou área de estudo torna a conceituação inicial de modelos estruturais e estratigráficos a primeira etapa crítica do processo. As abordagens de fluxo de trabalho têm a vantagem de fornecer um processo para garantir que as edições de suposições e restrições de dados se propaguem por todos os níveis do projeto concluído.

Embora algumas das técnicas discutidas se apliquem apenas a aquíferos clásticos, o método de construção de uma estrutura de modelo 3D a partir de mapas, seções transversais e superfícies contornadas é universalmente aplicável. Todos os modelos estatísticos e litológicos mais avançados discutidos ainda contam com uma estrutura 3D robusta. Desenhar estruturas 3D em papel e lápis ou quadro branco como uma equipe também é uma excelente maneira de construir consenso, definir suposições e facilitar a comunicação. Usar isso como um ponto de partida para projetos de modelagem é uma prática recomendada.

11 Referências

Brandenburg, J.P., 2020, Original figures.

Payne, F., J. Quinnan, e S. Potter, 2008, Remediation Hydraulics, 1st Edition. Chemical Rubber Company (CRC) Press. RockWare, 2020, <https://www.rockware.com/product/rockworks/>.

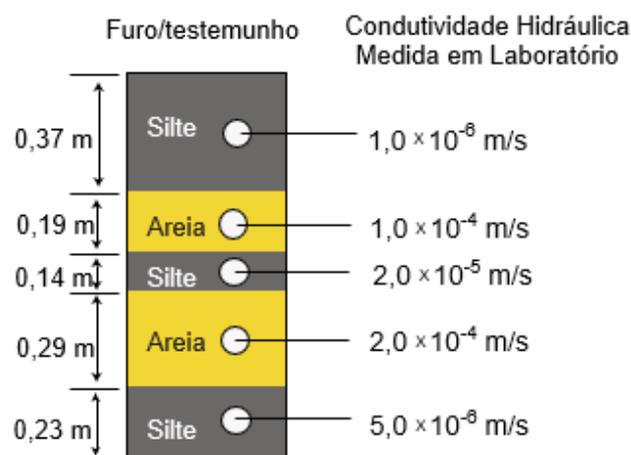
Schultz, M., R. Cramer, C. Plank, H. Levine, K. Ehman, 2017, Best practices for environmental site management: A practical guide for applying environmental sequence stratigraphy to improve conceptual site models. Technical Report. https://cfpub.epa.gov/si/si_public_file_download.cfm?p_download_id=536250&Lab=NRMRL.

Shepherd, M., 2009, Oil field production geology, AAPG Memoir 91, The American Association of Petroleum Geologists, Tulsa, Oklahoma, 350p.

12 Exercícios

Um método para analisar solo e testemunhos de rocha coletados durante a perfuração é a medição das propriedades hidráulicas de pequenas amostras centimétricas removidas do testemunho maior (“plugues de testemunho”) em um laboratório. Antes que os resultados possam ser usados para simulações de fluxo, são necessários cálculos de propriedades em massa.

Considere o seguinte furo/testemunho coletado de um depósito de silte em camadas e areia. O núcleo tem 1,22 metros de comprimento e é orientado verticalmente. A condutividade hidráulica foi calculada para cinco plugues do furo/testemunho:



Exercício 1

Se apenas o fluxo de água subterrânea através da areia é significativo, qual é a razão líquida / bruta desse furo?

[Clique aqui para ver a solução do exercício 1 ↴](#)

Exercício 2

Quais são as condutividades hidráulicas verticais e horizontais calculadas do volume representativo?

[Clique aqui para ver a solução do exercício 2 ↴](#)

Exercício 3

O que mais é necessário antes de usar as propriedades hidráulicas calculadas para um modelo de fluxo?

[Clique aqui para ver a solução do exercício 3 ↴](#)

Box 1 Criando Grade para Dados Esparsos

Com dados de um número suficiente de furos, todos os algoritmos de grade devem reproduzir a mesma superfície geológica. Com dados esparsos, as superfícies irão divergir umas das outras. Para o local de teste, a grade da superfície H01 usando apenas os dados de elevação medidos nos 14 furos é mostrado usando alguns métodos diferentes na **Figura Box 1-1**.

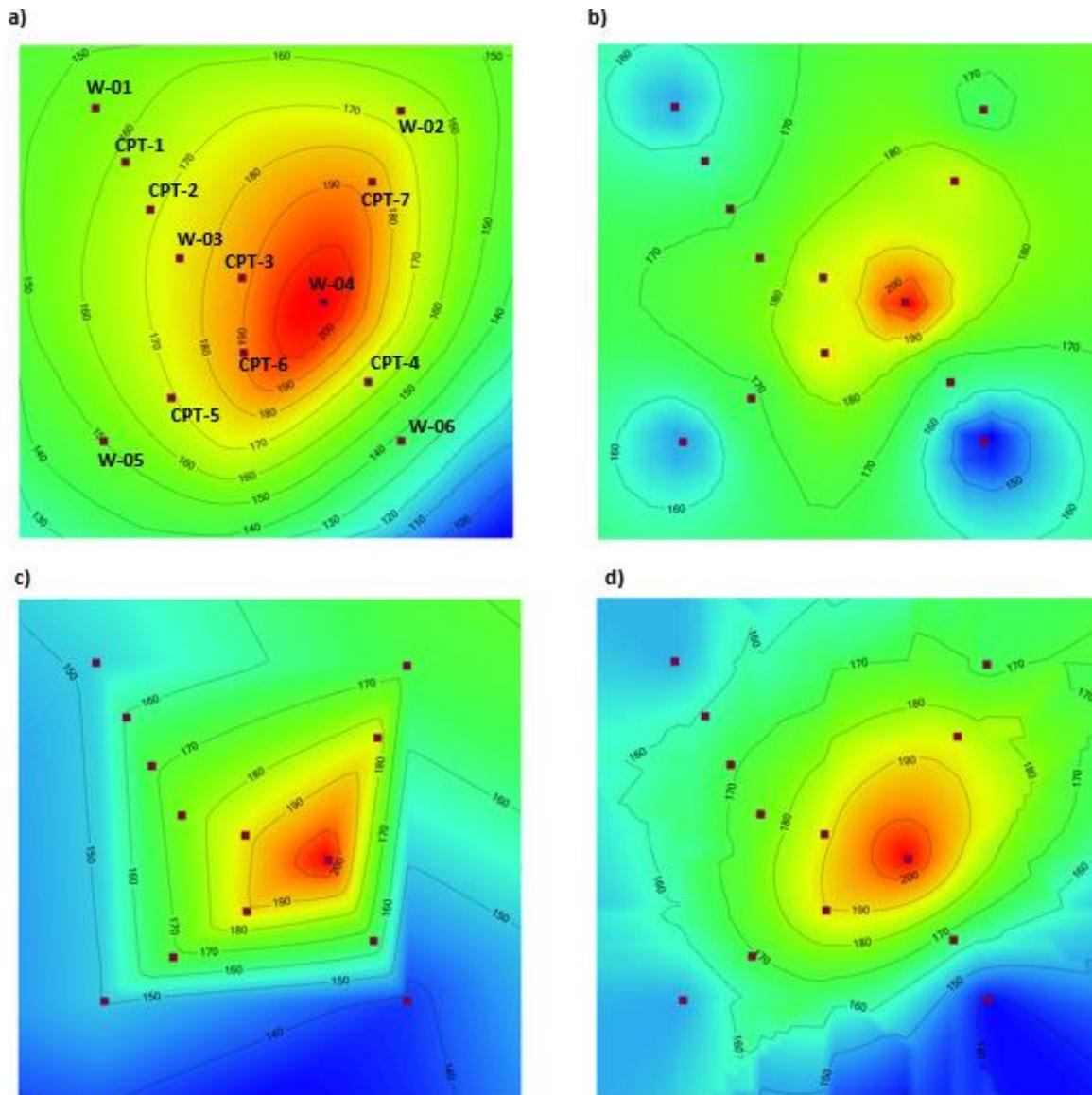


Figura Box 1-1 - Grade da superfície H01 usando apenas os dados de elevação medidos nos 14 furos usando: **a)** contornos estruturais desenhados à mão representando a “realidade” geológica; **b)** algoritmo de distância inversa; **c)** algoritmo de vizinhos naturais; e, **d)** algoritmo de Krigagem (Brandenburg, 2020, gw-project.org).

Essas imagens foram criadas com os algoritmos de grade disponíveis no Visual MODFLOW FLEX (Waterloo Hydrogeologic, 2020) usando principalmente parâmetros

padrão. Com a experiência, os parâmetros de grade podem ser ajustados para criar uma superfície mais próxima do que é esperado para H01. Isso é particularmente verdadeiro para a Krigagem, que é projetada para conjuntos de dados geológicos irregulares. No entanto, não importa a escolha do algoritmo, algum conceito prévio de geologia é necessário.

O desempenho dos algoritmos de grade é sempre pior nos limites da grade. Os algoritmos realizam interpolação dentro da área delimitada pelos pontos de dados e extrapolação para fora. A extrapolação é inerentemente mais incerta, o que pode resultar em artefatos de grade quando o limite está longe dos pontos de dados.

[Retorne para o Box 1](#) ↑

13 Soluções dos exercícios

Exercício 1 – Solução

Se apenas o fluxo de água subterrânea através da areia é significativo, qual é a razão líquida / bruta desse furo?

$$\frac{\text{Líquida}}{\text{Bruta}} = \frac{0,19 + 0,29}{0,37 + 0,19 + 0,14 + 0,29 + 0,23} = 0,39$$

[Retorne ao Exercício 1 ↴](#)

Exercício 2 – Solução

Quais são as condutividades hidráulicas verticais e horizontais calculadas do volume representativo?

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

$$\text{Condutividade hidráulica vertical} = Kv = 2,9 \times 10^{-6} \frac{m}{s}$$

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

$$\text{Condutividade hidráulica horizontal} = Kh = 6,7 \times 10^{-5} \frac{m}{s}$$

[Retorne ao Exercício 2 ↴](#)

Exercício 3 – Solução

O que mais é necessário antes de usar as propriedades hidráulicas calculadas para um modelo de fluxo?

Você precisaria saber como esse furo se encaixa na estrutura geológica do modelo. Algumas perguntas importantes a serem feitas: Qual é a escala do modelo em comparação com a escala do furo? Este furo seria razoavelmente representativo das unidades de fluxo com alguns metros, mas não para unidades com dezenas de metros de espessura. Os horizontes estratigráficos são horizontais ou apresentam um mergulho mensurável? Nesse caso, pode ser necessário aplicar uma correção de mergulho, como na Seção 5. Lembre-se de que a geologia provavelmente varia tanto horizontalmente quanto verticalmente, portanto, furos adicionais seriam necessários para aplicar esta metodologia com rigor.

[Retorne ao Exercício 3 ↴](#)

14 Sobre o Autor



Dr. JP Brandenburg é geólogo profissional na Haley & Aldrich, onde realiza modelagem de águas subterrâneas para uma variedade de aplicações ambientais, de mineração e recursos hídricos. Ele começou sua carreira de modelagem numérica em geodinâmica, estudando convecção viscosa no manto da Terra na Universidade de Michigan. Ele então se juntou à organização de pesquisa da Royal Dutch Shell, desenvolvendo métodos para modelar geologia estrutural complexa de subsuperfície em reservatórios de hidrocarbonetos. Depois de vários anos implantando essas técnicas na organização de exploração e produção da Shell, o Dr. Brandenburg focou na indústria ambiental. Além da modelagem aplicada, ele continua a se basear na experiência interdisciplinar para desenvolver novos métodos para capturar a heterogeneidade geológica do subsolo. O Dr. Brandenburg possui várias publicações em geodinâmica, geologia do petróleo, geologia estrutural e modelagem numérica.

15 Sobre a Tradutora



MSc. Thaís de Paula Marteleto é geóloga formada pela Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Durante a graduação realizou projetos de iniciação científica com ênfase na área de Ensino de Geociências e de Geoquímica Ambiental com a determinação de nutrientes inorgânicos no sistema estuarino de Santos-Cubatão (São Paulo). Possui Mestrado em Geociências na mesma universidade com projeto envolvendo Gd antrópico como traçador de esgotos em águas superficiais. Atualmente é aluna de doutorado com ênfase em Geoquímica Ambiental e Analítica no Instituto de Geociências da UNICAMP onde desenvolve projeto de pesquisa com foco na análise dos controles hidrogeológicos, hidrogeoquímicos e isotópicos (Li e U) em águas subterrâneas provenientes de aquíferos distintos no leste do estado de São Paulo, Brasil.

Inscreva-se na lista de e-mail do The Groundwater Project e mantenha-se informado sobre o lançamento de novos livros, eventos e formas de como participar do Groundwater Project. Quando você se inscreve em nossa lista de e-mail, isso nos ajuda a construir uma comunidade global de águas subterrâneas. [Inscreva-se](#)[↗].

