

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

ESCOLA POLITÉCNICA

RICARDO HENRIQUE BORDIGNON

**Importância da Estratigrafia Ambiental de Sequências na Elaboração de Modelos
Conceituais de Áreas Contaminadas**

São Paulo

2024

Importância da estratigrafia ambiental de sequências na elaboração de modelos conceituais de áreas contaminadas

Versão Original

Monografia apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo como parte dos requisitos para a obtenção do título de Especialista em Gestão de Áreas Contaminadas, Desenvolvimento Urbano Sustentável e Revitalização de Brownfields.

Orientador: Prof. Msc. Vicente de Aquino Neto

São Paulo

2024

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Catalogação na Publicação

BORDIGNON, RICARDO HENRIQUE

Importância da Estratigrafia Ambiental de Sequências na Elaboração de Modelos Conceituais / R. H. BORDIGNON -- São Paulo, 2024. 40 p.

Monografia (MBA em Gerenciamento de Áreas Contaminadas, Desenvolvimento Sustentável e Revitalização de Brownfields) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Química.

1.Estratigrafia de sequencias 2. Áreas contaminadas 3. Modelo Conceitual I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Química II.t.

AGRADECIMENTOS

A minha família, Maria Esther, minha esposa e meus filhos Pedro e Helena.

A minha Vó, Francisca Matias da Silva (*in memoriam*), carinhosamente e inexplicavelmente chamada de Sofia. Foi quem me criou e me educou e no final do ano passado, virou uma estrelinha, como diz minha filha Helena.

Agradeço a Universidade de São Paulo, que possibilitou a mim a oportunidade de me especializar em uma área extremamente importante para a sociedade.

Agradecimento especial ao Prof. Msc. Vicente de Aquino Neto pela orientação deste trabalho e sugestão do tema.

A todos que de alguma forma contribuíram para a conclusão deste trabalho.

"... em nossas investigações,

não logramos encontrar

nenhum indício de um começo

e nenhum vestígio de um fim...".

(James Hutton)

RESUMO

Atualmente as áreas contaminadas representam um grande desafio para a gestão ambiental, exigindo técnicas e abordagens inovadoras e eficazes na sua investigação e definição das medidas de intervenção necessárias para o seu gerenciamento. Nesse contexto, a Estratigrafia Ambiental de Sequências (EAS) surge como uma ferramenta essencial na elaboração de modelos conceituais, permitindo a visualização tridimensional da geologia, e a compreensão detalhada da dinâmica de fluxo e da distribuição temporal e espacial dos contaminantes. A aplicação dos princípios e métodos da EAS fornece uma base para a compreensão do fluxo estratigráfico e do transporte de contaminantes associados e aplicáveis a aquíferos sedimentares clásticos.

Embora os impactos da heterogeneidade estratigráfica no fluxo das águas subterrâneas e no transporte de contaminantes sejam reconhecidos há muito tempo, o tratamento de aquíferos como meios porosos isotrópicos e homogêneos continua a ser comum na concepção e implementação de soluções para águas subterrâneas. Tal como acontece com a indústria de remediação de águas subterrâneas, os problemas relacionados com o fluxo de fluidos subterrâneos decorrentes da heterogeneidade estratigráfica desafiam há muito tempo a indústria petrolífera, impactando o sucesso da exploração e a produção do campo. Ferramentas como estratigrafia de sequência e modelos de fácies foram desenvolvidas para resolver esses problemas e fazer previsões entre poços individuais em relação à continuidade e heterogeneidade do reservatório.

Em cada ambiente deposicional, processos característicos operam para erodir, transportar, distribuir e depositar sedimentos. Devido a esses processos, cada ambiente deposicional deixa uma sequência de sedimentos característicos no registro geológico. Essas sequências são comumente chamadas de “elementos arquitetônicos” e possuem perfis verticais característicos de granulometria, dimensões, litologia e associações de fácies. Esses elementos arquitetônicos se encaixam em três dimensões para formar uma “arquitetura estratigráfica” de uma unidade sedimentar.

Independentemente da sua localização geográfica, locais com ambientes deposicionais semelhantes também compartilham distribuição característica de unidades litológicas. Unidades litológicas de granulação grossa (ricas em areia) (por exemplo, depósitos de barras

pontuais, preenchimentos de canais, leques aluviais) normalmente definem os caminhos primários de fluxo de água subterrânea e são aqui referidos como “unidades hidroestratigráficas” permeáveis (HSUs – HydroStratigraphic Units”). Como as HSUs se comportam como o “encanamento” do subsolo, um dos objetivos da caracterização do local é a identificação e o mapeamento das HSU.

A aplicação do EAS fornece uma ferramenta de investigação ambiental baseada na geologia, e sua abordagem representa um recurso indispensável para avaliação de locais complexos de águas subterrâneas contaminadas e exemplifica porque uma compreensão detalhada da geologia subterrânea é imprescindível para distinguir áreas de origens potenciais e caminhos hidroestratigráficos.

ABSTRACT

Contaminated areas currently represent a major challenge for environmental management, requiring innovative and effective techniques and approaches in their investigation and definition of the intervention measures necessary for their management. In this context, Environmental Sequence Stratigraphy (EAS) emerges as an essential tool in the development of conceptual models, allowing the three-dimensional visualization of geology, and the detailed understanding of flow dynamics and the temporal and spatial distribution of contaminants. Application of EAS principles and methods provides a basis for understanding the stratigraphic flow and transport of contaminants associated with and applicable to clastic sedimentary aquifers.

Although the impacts of stratigraphic heterogeneity on groundwater flow and contaminant transport have long been recognized, the treatment of aquifers as homogeneous, isotropic porous media continues to be common in the design and implementation of groundwater solutions. As with the groundwater remediation industry, problems related to underground fluid flow arising from stratigraphic heterogeneity have long challenged the petroleum industry, impacting the success of exploration and field production. Tools such as sequence stratigraphy and facies models have been developed to solve these problems and make predictions between individual wells regarding reservoir continuity and heterogeneity.

In each depositional environment, characteristic processes operate to erode, transport, distribute, and deposit sediments. Due to these processes, each depositional environment leaves a sequence of characteristic sediments in the geological record. These sequences are commonly called “specific elements” and have specific vertical profiles of grain size, dimensions, lithology and facies associations. These modern elements fit together in three dimensions to form a “stratigraphic architecture” of a sedimentary unit.

Regardless of their geographic location, sites with similar depositional environments also include characteristic distributions of lithologic units. Coarse-grained (sand-rich) lithologic units (e.g., point bar deposits, channel fills, alluvial fans) typically define the primary paths of underground water flow and are referred to herein as permeable “hydrostratigraphic units” (HSUs). – Hydrostratigraphic Units”). As HSUs behave like the “plumbing” of the subsoil, one of the objectives of site characterization is the identification and mapping of HSUs.

The application of EAS provides a tool for geology-based environmental sensemaking, and its approach represents an indispensable resource for assessing complex contaminated groundwater sites and exemplifies why detailed understanding of subsurface geology is necessary to distinguish potential source areas and hydrostratigraphic pathways.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Escalas de heterogeneidade estratigráfica em aquíferos clásticos.	15
Figura 2 – Ambientes de sedimentação.	16
Figura 3 - Classificação geral dos sistemas fluviais e seus depósitos.	20
Figura 4 - Subambientes fluviais meandrante.	21
Figura 5 - Esquema de evolução de meandros de um rio.	21
Figura 6 - Padrões de empilhamento estratigráfico fluvial (modificado de Allen et al, 1996).22	22
Figura 7 – Modelo tridimensional de fácies de uma barreira costeira em progressão.	24
Figura 8 – Acomodação impulsionada pela variação do nível do mar e aporte de sedimentos.	25
Figura 9 – Registros gráficos de granulometria para definir ocorrências de depósitos de canais.	29
Figura 10 – Seção transversal com registros gráficos de granulometria para definir ocorrências de depósitos de canais.	33
Figura 11 – Seções com registros gráficos de granulometria e impressões digitais de contaminantes.	34
Figura 12 – Seção transversal mostrando um erro comum na correlação de dados de subsuperfície.	36

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	12
2.	OBJETIVOS	13
3.	JUSTIFICATIVA.....	13
4.	MATERIAIS E MÉTODOS	14
5.	FUNDAMENTAÇÃO BIBLIOGRÁFICA PRELIMINAR	14
5.1.	Heterogeneidade	14
5.2.	Ambientes de Sedimentação ou Deposicionais e Modelo de Fácies	15
5.3.	Unidades Hidro Estratigráficas (HSU).....	19
5.4.	Modelo de Fácies para sistemas de deposição fluvial.....	19
5.5.	Estratigrafia de Sequências	23
5.6.	Modelo de Fácies para sistemas de deposição costeiros.....	23
5.7.	Aplicação da Estratigrafia Ambiental de Sequência - EAS.....	26
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	37
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	39

1. INTRODUÇÃO

Atualmente as áreas contaminadas representam um grande desafio para a gestão ambiental, exigindo técnicas e abordagens inovadoras e eficazes na sua investigação e definição das medidas de intervenção necessárias para o seu gerenciamento. Nesse contexto, a Estratigrafia Ambiental de Sequências (EAS) surge como uma ferramenta essencial na elaboração de modelos conceituais, permitindo a visualização tridimensional da geologia, e a compreensão detalhada da dinâmica de fluxo e da distribuição temporal e espacial dos contaminantes.

A aplicação dos princípios e métodos da EAS fornece uma base para a compreensão do fluxo estratigráfico e do transporte de contaminantes associados e aplicáveis a aquíferos sedimentares clásticos (SHULTZ et al., 2017). Para um melhor entendimento da abordagem EAS, tornam-se imprescindíveis alguns conceitos e definições na área de geologia sedimentar, mais especificamente estratigrafia de sequências e modelo de fácies.

A ciência da estratigrafia de sequência foi inicialmente desenvolvida na indústria do petróleo com base em estudos sísmicos de reflexão à escala da bacia e na identificação de padrões sísmicos nas margens continentais relacionados com as mudanças globais do nível do mar para fins de exploração de petróleo (CRAMER et al., 2017).

A estratigrafia de sequências é definida como o estudo de depósitos sedimentares no contexto de seus respectivos ambientes deposicionais, mudanças do nível relativo do mar, aporte de sedimentos e locais de deposição disponíveis (SHULTZ et al., 2017).

Modelo de Fácies é definida como um modelo conceitual que descreve os processos que atuam em um determinado ambiente deposicional para transportar, depositar e preservar sedimentos, geralmente apresentado como um bloco diagrama tridimensional que ilustra a organização dos corpos sedimentares no registro estratigráfico (SHULTZ et al., 2017).

A EAS se refere à aplicação dos conceitos de estratigrafia de sequências e modelos de fácies aos tipos de conjunto de dados coletados para investigações ambientais de águas subterrâneas (SHULTZ et al., 2017).

A abordagem da EAS utiliza o conhecimento de ambientes deposicionais para mapear e prever condições heterogêneas do subsolo e fornece um Modelo Conceitual Geológico e Hidrogeológico do Local (MCL) mais representativo, e consequentemente aprimorar a busca por soluções e auxiliando na tomada de decisões (CRAMER et al., 2017).

A estratigrafia de sequência e os modelos de fácies representam as melhores práticas atuais para prever e delinear a geometria e a continuidade dos estratos subterrâneos (CRAMER et al., 2017).

2. OBJETIVOS

Este projeto visa contribuir com a gerenciamento de áreas contaminadas demonstrando a importância da EAS na elaboração de Modelos Conceituais Locais bem desenvolvidos e na adoção de boas estratégias de avaliação, remediação e monitoramento.

3. JUSTIFICATIVA

Uma boa compreensão da distribuição espacial e evolução temporal dos contaminantes é essencial para o desenvolvimento de estratégias eficazes no que diz respeito ao gerenciamento de áreas contaminadas. A EAS fornece uma abordagem sistemática para alcançar esse entendimento, influenciando diretamente na elaboração de modelos conceituais e embasando as principais decisões no gerenciamento de áreas contaminadas.

Embora os impactos da heterogeneidade estratigráfica no fluxo das águas subterrâneas e no transporte de contaminantes sejam reconhecidos há muito tempo, o tratamento de aquíferos como meios porosos isotrópicos e homogêneos continua a ser comum na concepção e implementação de soluções para águas subterrâneas (SHULTZ et al., 2017).

Tal como acontece com a indústria de remediação de águas subterrâneas, os problemas relacionados com o fluxo de fluidos subterrâneos decorrentes da heterogeneidade estratigráfica desafiam há muito tempo a indústria petrolífera, impactando o sucesso da exploração e a produção do campo. Ferramentas como estratigrafia de sequência e modelos de fácies foram desenvolvidas para resolver esses problemas e fazer previsões entre poços individuais em relação à continuidade e heterogeneidade do reservatório (SHULTZ et al., 2017).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Este estudo foi desenvolvido através de uma revisão da literatura. Foram discutidos, propostos e aplicados conceitos e técnicas da estratigrafia ambiental de sequências na elaboração de modelos conceituais de áreas contaminadas.

5. FUNDAMENTAÇÃO BIBLIOGRÁFICA PRELIMINAR

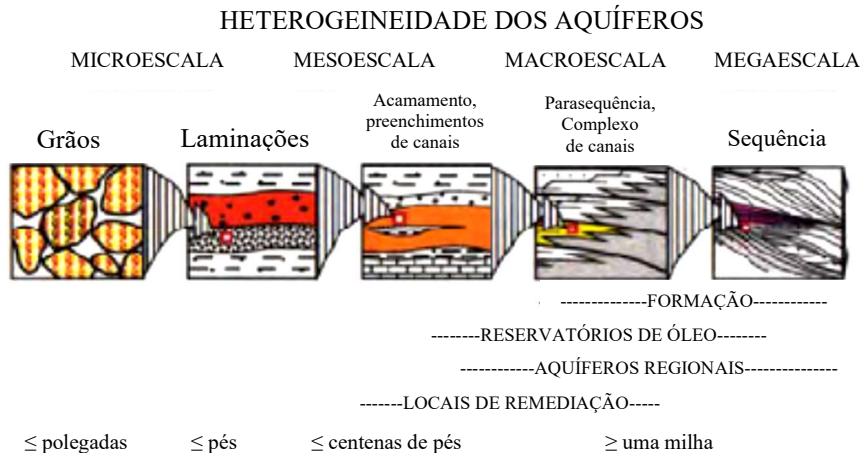
A fundamentação bibliográfica abordou temas relacionados à heterogeneidade do meio, ambientes de sedimentação, modelos de fácies e estratigrafia de sequências. Foram explorados estudos específicos na área de estratigrafia ambiental de sequências, que utilizaram estudo de caso que destacam o impacto positivo dessa abordagem na caracterização de áreas contaminadas.

5.1. Heterogeneidade

As direções do fluxo das plumas de contaminação em fase dissolvida nas águas subterrâneas podem variar muito em relação a direção de fluxo regional das águas subterrâneas devido à anisotropia resultante da heterogeneidade litológica (SHULTZ et al., 2017). Em muitos casos os sedimentos (areia, silte e argila) não são depositados com um “bolo de camadas”, mas sim na forma de “telhas” sobrepostas ou deslocadas lateralmente.

A heterogeneidade da permeabilidade é inerente ao subsolo e interage com o gradiente regional das águas subterrâneas para controlar o fluxo das águas subterrâneas e o transporte de contaminantes. Em sistemas aquíferos sedimentares clásticos (ou seja, depósitos de cascalho, areia, silte e argila), esta heterogeneidade de permeabilidade é principalmente devida à heterogeneidade litológica e granulométrica em três dimensões, denominada “heterogeneidade estratigráfica”, com mudanças pós deposicionais (bioturbação, compactação, cimentação, alteração etc.) como fatores contribuintes. A heterogeneidade estratigráfica é transmitida pelos processos físicos que atuam para transportar, depositar e soterrar sedimentos e está presente em todas as escalas, desde poro (microescala) até regional (macroescala) (SHULTZ et al., 2017), como apresentado na Figura 1.

Figura 1 – Escalas de heterogeneidade estratigráfica em aquíferos clásticos.



Fonte: (SHULTZ et al., 2017).

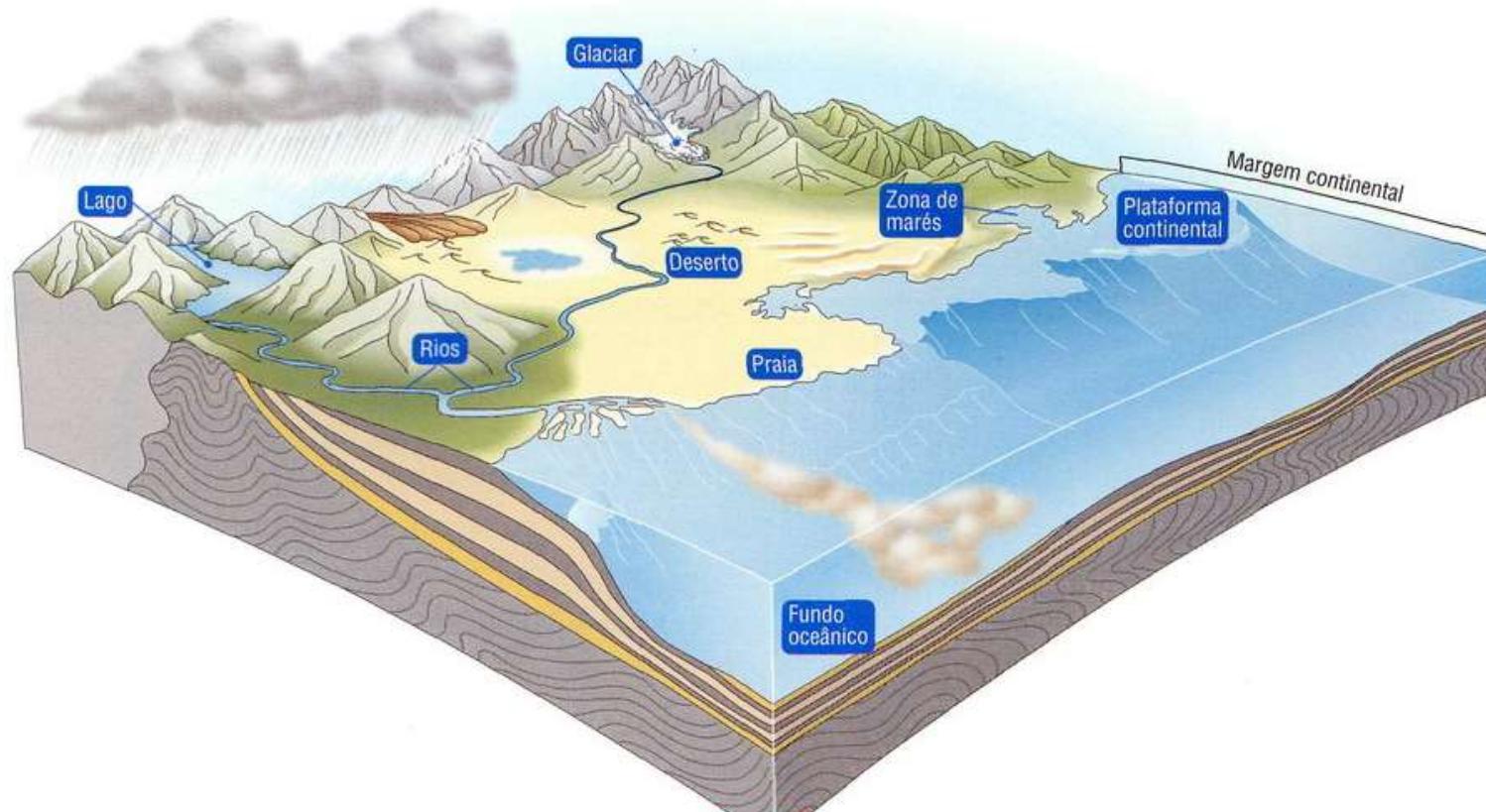
5.2. Ambientes de Sedimentação ou Deposicionais e Modelo de Fáries

As áreas geográficas onde os sedimentos se acumulam ao longo de períodos geológicos são referidas como “ambientes deposicionais” (SHULTZ et al., 2017) (Figura 2).

A deposição de sedimentos num determinado local é controlada não apenas pelos processos de deposição em operação, mas também pela interação de múltiplos fatores. Esses fatores incluem mudança no nível do mar (magnitude e velocidade), quantidade de sedimentos entregues, clima e história tectônica de uma área (Miall, 2000). À medida que estes fatores mudam com o tempo, os ambientes deposicionais mudam lateralmente ou podem mudar completamente (SHULTZ et al., 2017).

Durante uma transgressão, por exemplo, à medida que o nível do mar aumenta, a linha costeira move-se em direção à terra, colocando depósitos marinhos sobre depósitos terrestres. Inversamente, durante uma regressão, a linha costeira move-se em direção ao mar, muitas vezes levando à erosão de sedimentos (SHULTZ et al., 2017).

Figura 2 – Ambientes de sedimentação.



Fonte: desconhecido

Nas regiões costeiras, as flutuações no nível do mar resultantes dos ciclos glaciais e interglaciais quaternários resultaram em uma série de eventos erosivos e deposicionais, e fizeram com que os ambientes deposicionais se deslocassem em direção à terra e ao mar com a subida e descida do nível do mar, respectivamente. Durante os períodos glaciais, a água do mar foi sequestrada em mantos de gelo continentais. Como resultado, o nível do mar baixou até 120 metros, expondo as plataformas continentais modernas à erosão. Durante esses tempos, os sistemas fluviais que entravam no oceano esculpiram vales erosivos conhecidos como “vales incisos”, que prevalecem nas regiões costeiras de todo o mundo. Durante o degelo, esses vales foram preenchidos com depósitos fluviais ou inundados pela elevação do nível do mar (SHULTZ et al., 2017).

Em cada ambiente deposicional, processos característicos operam para erodir, transportar, distribuir e depositar sedimentos. Devido a esses processos, cada ambiente deposicional deixa uma sequência de sedimentos característicos no registro geológico. Essas sequências são comumente chamadas de “elementos arquitetônicos” e possuem perfis verticais característicos de granulometria, dimensões, litologia e associações de fácies (Tabela 1). Esses elementos arquitetônicos se encaixam em três dimensões para formar uma “arquitetura estratigráfica” de uma unidade sedimentar. Observações de depósitos sedimentares em ambientes modernos, sistemas de afloramento e sistemas subterrâneos foram destiladas ao longo de décadas de pesquisa, e conceituações de como esses processos interagem e a organização tridimensional dos elementos arquitetônicos que eles produzem existem para praticamente todos os ambientes deposicionais. Esses modelos conceituais são chamados de “modelos deposicionais” ou “modelos de fácies” (SHULTZ et al., 2017).

Tabela 1- Tabela mostrando perfis verticais de granulometria de uma variedade de ambientes deposicionais, principais elementos de aquíferos e aquitardes e suas dimensões comuns, impacto nos MCLs e implicações para a resolução de dados necessária para caracterização de locais de remediação de águas subterrâneas.

Ambiente deposicional e perfil granulométrico típico	Principais elementos do aquífero e suas dimensões comuns	Principais elementos do aquífero e suas dimensões comuns	Consequência no MCL	Resolução necessários dos dados
Leques aluviais	 <p>Canais de leques proximais, areias intermedias e franjas arenosas distais X: 10^2 m - 10^3 m Y: 10^2 m - 10^3 m Z: 10^{-1} m - 10^{-3} m</p>	<p>Depósito de <i>Playa Lake</i> com lobos separados verticalmente X: 10^2 m - 10^3 m Y: 10^2 m - 10^3 m Z: 10^{-1} m - 10^{-3} m</p>	<p>Depósitos lateralmente extensos em <i>playa lake</i> podem facilmente passar despercebidos pelos métodos de amostragem tradicionais devido à sua espessura, mas podem compartilhar verticalmente o aquífero com concentrações de contaminantes diferentes. Os depósitos de <i>playa lake</i> mergulham em direção à bacia, de 2 a 6 graus, levando ao potencial para correlações errôneas.</p>	<p>Alto na vertical Baixo na horizontal</p>
Fluvial meandrante	 <p>Canais, barras em pontal, espalhamento X: 1 m - 10^{-3} m Y: 10^2 m - 10^3 m Z: 10^{-1} m - 10 m</p>	<p>Depósitos de planicie de inundação, diques, argilas nas superfícies acréscimo lateral e canais abandonados preenchidos X: 10^2 m - 10^3 m Y: 10^2 m - 10^3 m Z: 10^{-1} m - 10^{-3} m</p>	<p>Devido à areia e cascalho bem selecionados nos canais, a permeabilidade pode ser muito maior nesta zona. Alto risco de transporte de contaminação para fora do local devido ao fluxo de águas subterrâneas controlado pela orientação do canal e não ao fluxo de águas subterrâneas até 270 graus do gradiente regional. Preenchimentos de canal altamente assimétricos, erosão das margens caracterizada por borda erosiva afiada e barra pontiaguda caracterizada por intercalação com finos, impactando o potencial de armazenamento de massa contaminante. As cortinas de acréscimo lateral podem ser depósitos de barras pontuais separados que parecem estar conectados lateralmente.</p>	<p>Alto se o tamanho do site for maior que a largura do canal</p>
Fluvial entrelaçado	 <p>Canais, barras X: 1 m - 10^{-3} m Y: 10^2 m - 10^3 m Z: 10^{-1} m - 1's m</p>	<p>Depósitos de planicie de inundação, canais abandonados preenchidos por siltes e argilas X: 10^2 m - 10^3 m Y: 10^2 m - 10^3 m Z: 10^{-1} m - 1's m</p>	<p>Fluxo irregular de águas subterrâneas com zonas isoladas de alta permeabilidade. No geral, alta permeabilidade e porosidade com depósitos de canais adelgazados. Fluxo local de água subterrânea até 90 graus do gradiente, mas normalmente dentro de 45 graus do gradiente.</p>	<p>Alto, mas depende do grau de adelgaçamento de canais determinado pelo conteúdo de finos (conteúdo de finos maior resulta em menos conectividade de canal)</p>
Costeiros	 <p>Barreiras off shore e areias transgressivas X: 10^{-3} m - 10^2 m Y: 10^2 m - 10^3 m Z: 10^{-1} m - 10 m</p>	<p>Folhelhos transgressivos X: 10^{-3} m - 10^2 m Y: 10^2 m - 10^3 m Z: 10^{-1} m - 10 m</p>	<p>Depósitos lateralmente extensos e ricos em areia. Depósitos de tempestade (granulação mais grossa) intercalados com depósitos de bom tempo (granulação mais fina) levam a altos graus de heterogeneidade vertical, e relação Kv/Kh baixa ou muito baixa.</p>	<p>Baixa na horizontal Alta na vertical</p>
Ante praia, deltaico	 <p>Praia (superior) e plataforma (inferior) X: 10^{-3} m - 10^2 m Y: 10^2 m - 10^3 m Z: 10^{-1} m - 10 m</p>	<p>Folhelhos transgressivos X: 10^{-3} m - 10^2 m Y: 10^2 m - 10^3 m Z: 10^{-1} m - 10 m</p>	<p>Unidades próximas à costa, lateralmente extensas e ricas em areia, nas partes superiores das sequências. Alto grau de intercalação de unidades de granulação grossa e fina nas partes inferiores. Leitos de lodo e argila que cobrem as sequências, mergulham em direção à bacia, podem levar a correlações errôneas em distâncias de centenas de metros a quilômetros.</p>	<p>Baixa na horizontal Alta na vertical</p>

Fonte: (SHULTZ et al., 2017).

5.3. Unidades Hidro Estratigráficas (HSU)

Independentemente da sua localização geográfica, locais com ambientes deposicionais semelhantes também compartilham distribuição característica de unidades litológicas. Unidades litológicas de granulação grossa (ricas em areia) (por exemplo, depósitos de barras pontuais, preenchimentos de canais, leques aluviais) normalmente definem os caminhos primários de fluxo de água subterrânea e são aqui referidos como “unidades hidro estratigráficas” permeáveis (HSUs – HydroStratigraphic Units”). Como as HSUs se comportam como o “encanamento” do subsolo, um dos objetivos da caracterização do local é a identificação e o mapeamento das HSU. (SHULTZ et al., 2017).

5.4. Modelo de Fáries para sistemas de deposição fluvial

Os ambientes fluviais são caracterizados por uma variedade de processos sedimentares, incluindo a erosão do leito do rio, transporte de sedimentos e deposição em diferentes áreas ao longo do curso fluvial. Os modelos de fáries abordam a variabilidade espacial e temporal desses processos, classificando os depósitos em modelos de fáries específicos, como leques aluviais, canais meandrantes, planícies de inundação, rompimento de diques marginais, barras fluviais ou barras em pontal, dentre outros. Estes ambientes refletem não apenas processos sedimentares, mas também respondem a variáveis como clima, geologia regional e tectônica (READING, 1996).

A dinâmica dos rios está intrinsecamente ligada aos processos de transporte e deposição de sedimentos. Durante eventos de cheias, os rios transportam sedimentos grosseiros, depositando-os em barras fluviais e formando leques aluviais, enquanto sedimentos mais finos podem se acumular em áreas de menor energia, como planícies de inundação (READING, 1996).

A arquitetura de depósitos fluviais reflete a variabilidade nas condições ambientais ao longo do tempo. Sequências sedimentares em ambientes fluviais muitas vezes exibem camadas distintas, incluindo arenitos fluviais, conglomerados de canal e depósitos de inundação resultando em uma diversidade de fáries sedimentares, com diferentes texturas e composições dos sedimentos. Fáries típicas incluem arenitos de canal, conglomerados de leque aluvial e

argilas de planície de inundação, cada uma refletindo as condições específicas de deposição (READING, 1996).

Dentre os fatores que controlam a morfologia e a dinâmica dos ambientes fluviais, a declividade do terreno, regime de precipitação, vegetação circundante e geologia local exercem papéis fundamentais na configuração desses ambientes, influenciando os padrões de erosão, transporte e deposição (READING, 1996).

Embora exista um semelhanças entre tipos de sistema, os sistemas fluviais podem ser subdivididos em entrelaçados, meandrantes e, menos comum, os anastomosados (Figura 3).

Processos fluviais meandrantes resultam na deposição de “barras pontuais”, que são unidades de areia acumuladas lateralmente e depositadas na curva interna dos canais à medida que a curva externa do canal erode os depósitos mais antigos e o eixo do canal migra em direção à curva externa do canal (Figuras 3, 4 e 5) (SHULTZ et al., 2017).

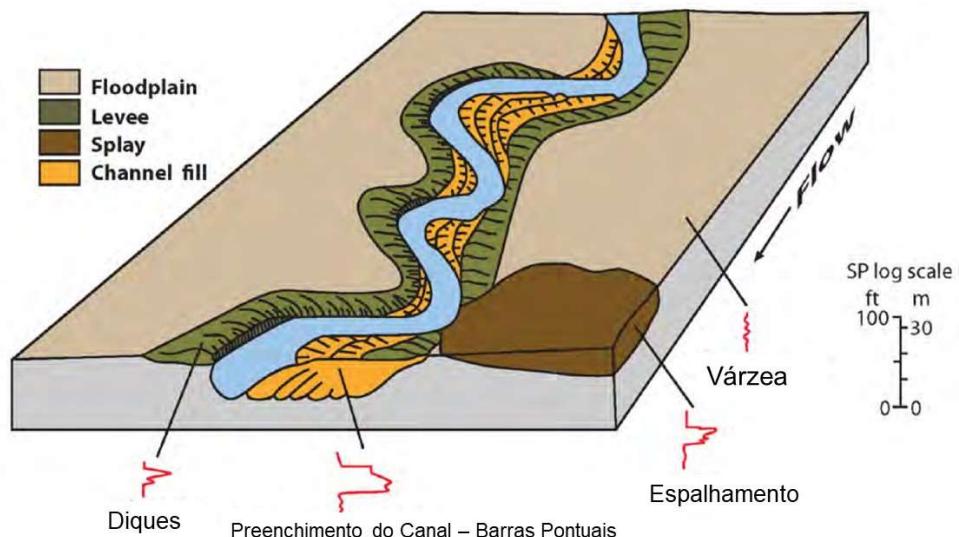
Dentro de um ambiente fluvial meandrante, muitos subambientes estão presentes e podem ser diferenciados com base em assinaturas de perfil geofísico que representam padrões verticais de tamanho de grão associados aos subambientes (gráficos logarítmicos mostrando o aumento do tamanho de grão à direita) (Figura 4). Depósitos de diferentes subambientes possuem dimensões, orientações e impacto característicos no fluxo das águas subterrâneas (SHULTZ et al., 2017).

Figura 3 - Classificação geral dos sistemas fluviais e seus depósitos.

Tipo de Rio	Imagen aérea	Distribuição de areia	Seção	Perfil	Empilhamento do Canal
Entreleçado					
Meandrante					
Anastomosado					

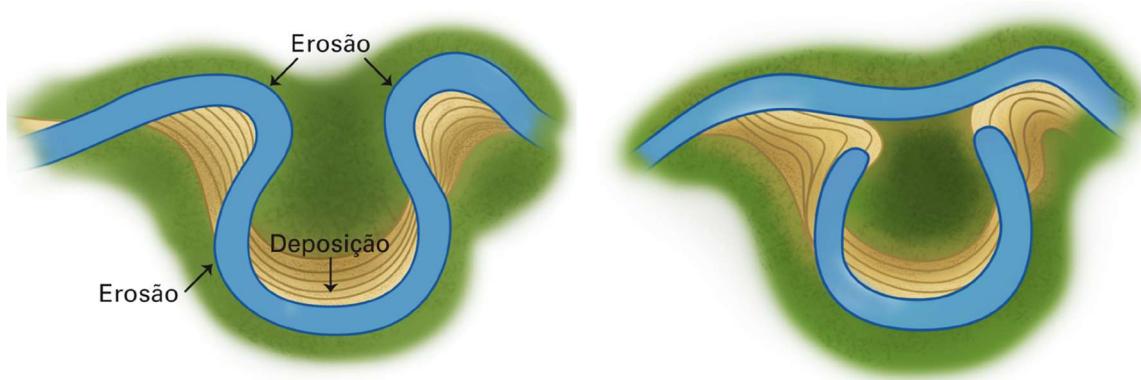
Fonte: (SHULTZ et al., 2017).

Figura 4 - Subambientes fluviais meandrante.



Fonte: (SHULTZ et al., 2017).

Figura 5 - Esquema de evolução de meandros de um rio.

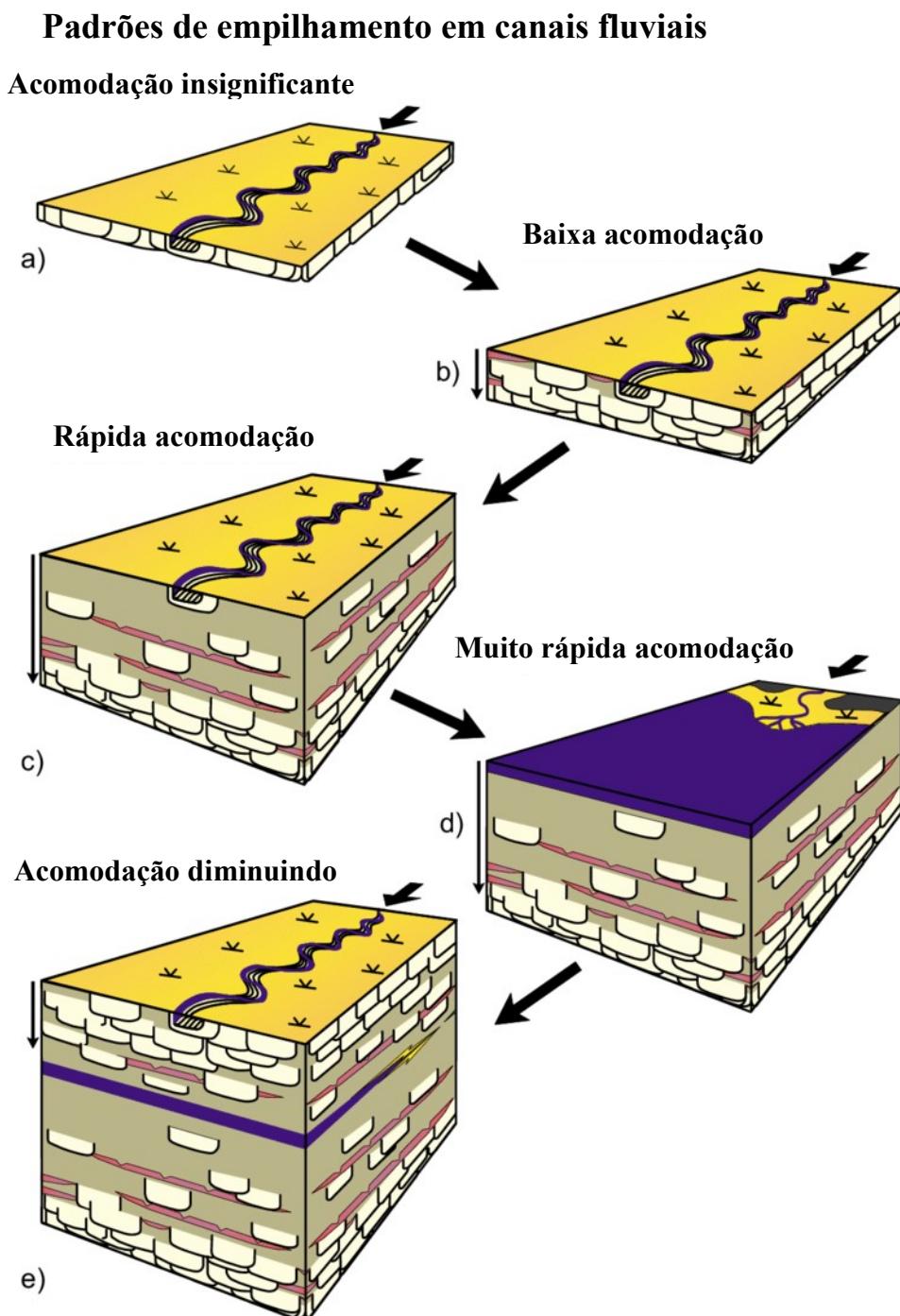


Fonte: (TEIXEIRA et al., 2009).

Na figura 6 é possível observar o empilhamento estratigráfico fluvial meandrante. (a) depósito, insignificante em relação ao abastecimento de sedimentos, produzindo camada de areia com alta interconectividade. (b-c) Aumento da acomodação relativa ao fornecimento de sedimentos e diminuição da conectividade dos corpos dos canais fluviais, com carvão e/ou

paleossolos desenvolvidos em planícies aluviais. (d) Maior taxa de acomodação em relação ao fornecimento de sedimentos e desenvolvimento de uma superfície de inundação máxima lacustre. (e) Diminuição da acomodação relativa ao fornecimento de sedimentos mostrando crescente interconectividade de corpos de canais fluviais.

Figura 6 - Padrões de empilhamento estratigráfico fluvial (modificado de Allen et al, 1996).



Fonte: LANG, S.C. et al. (2021).

5.5. Estratigrafia de Sequências

A estratigrafia de sequências é uma importante abordagem na geologia sedimentar que busca compreender a organização temporal e espacial dos depósitos sedimentares por meio da identificação de padrões recorrentes em escalas diferentes. O desenvolvimento dessa disciplina foi impulsionado por avanços significativos nas técnicas de mapeamento, coleta de dados e interpretação estratigráfica.

Vail et. Al, (1977) foram os pioneiros no que diz respeito ao estudo da estratigrafia de sequências com a obra “Seismic Stratigraphy and Global Changes of Sea Level”, se tornando um marco fundamental na estratigrafia de sequências. No trabalho, os autores apresentaram a ideia de que as rochas sedimentares podem ser agrupadas em sequências estratigráficas, definidas por superfícies de sequência, que refletem variações no nível do mar ao longo do tempo geológico.

5.6. Modelo de Fácies para sistemas de deposição costeiros

Para compreender melhor os sistemas de deposição costeiros são necessárias abordagens sobre os conceitos de regressão e transgressão marinha, processos geológicos fundamentais que moldam as margens costeiras, com as mudanças na posição relativa do nível do mar em relação à linha da costa ao longo do tempo geológico. Esses processos têm implicações significativas na dinâmica costeira, na formação de sequências sedimentares.

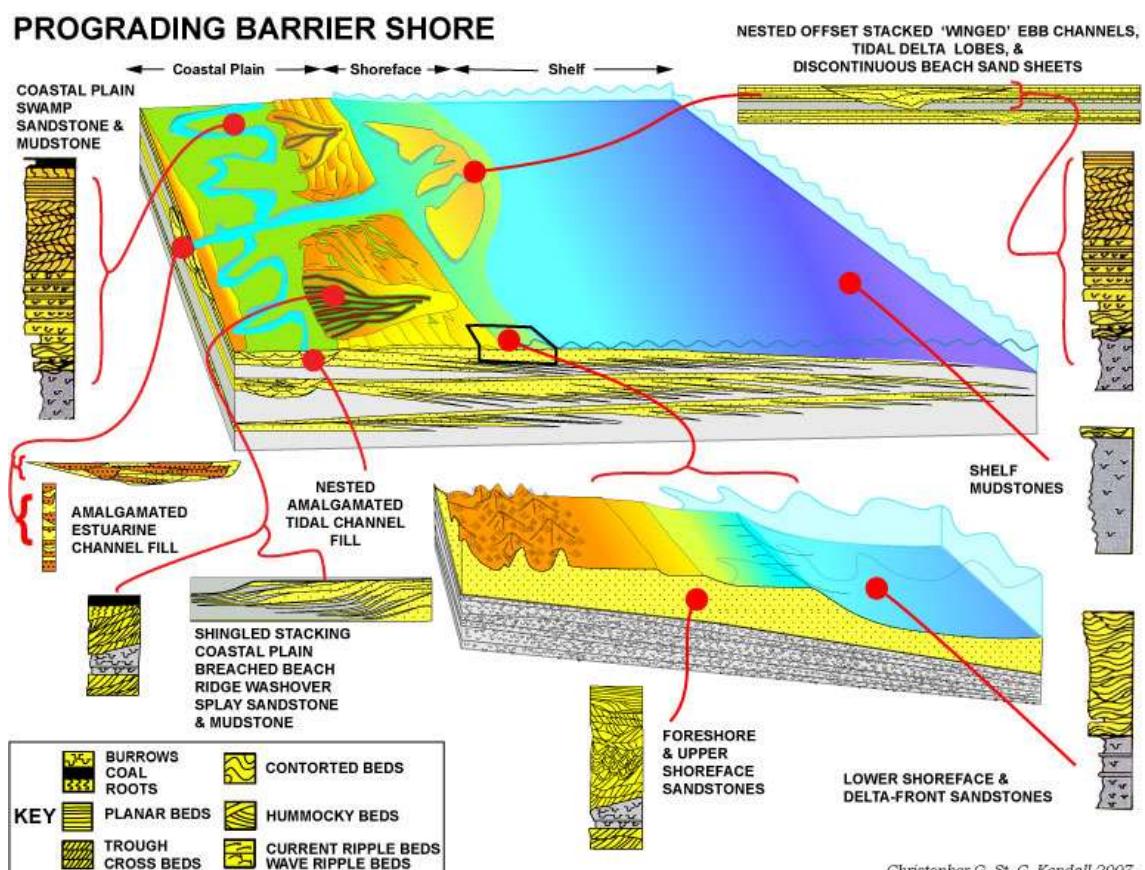
Nas regiões costeiras, as flutuações no nível do mar resultantes dos ciclos glaciais e interglaciais quaternários resultaram em uma série de eventos erosivos e deposicionais, e fizeram com que os ambientes deposicionais se deslocassem em direção à terra e ao mar com a subida e descida do nível do mar, respectivamente. Durante os períodos glaciais, a água do mar foi sequestrada em mantos de gelo continentais. Como resultado, o nível do mar baixou até 120 metros, expondo as plataformas continentais modernas à erosão. Durante esses tempos, os sistemas fluviais que entravam no oceano esculpiram vales erosivos conhecidos como “vales incisos”, que prevalecem nas regiões costeiras de todo o mundo. Durante o degelo, esses vales foram preenchidos com depósitos fluviais ou inundados pela elevação do nível do mar (SHULTZ et al., 2017).

A transgressão marinha, caracterizada pelo avanço do nível do mar em direção à terra, deixa uma assinatura estratigráfica distintiva. Durante períodos de transgressão, as sequências sedimentares frequentemente mostram camadas de sedimentos marinhos que cobrem sucessões continentais. Essa sobreposição estratigráfica reflete a inundação progressiva de áreas terrestres e fornece dados valiosos sobre as mudanças paleogeográficas (VAIL et al., 1978).

Ao contrário da transgressão, a regressão marinha, marcada pelo recuo do nível do mar, deixa uma assinatura estratigráfica que inclui a sobreposição de sedimentos continentais sobre depósitos marinhos. As sequências sedimentares geradas durante a regressão oferecem informações sobre a exposição progressiva de áreas previamente submersas, evidenciando a formação de terraços marinhos e deltas fluviais (VAIL et al., 1978).

A figura 7 apresenta um modelo tridimensional de fácies de uma barreira costeira em progressão desenvolvida através da integração de observações de sistemas modernos de ilhas-barreira, afloramentos de sistemas antigos e conjuntos de dados subterrâneos em todo o mundo.

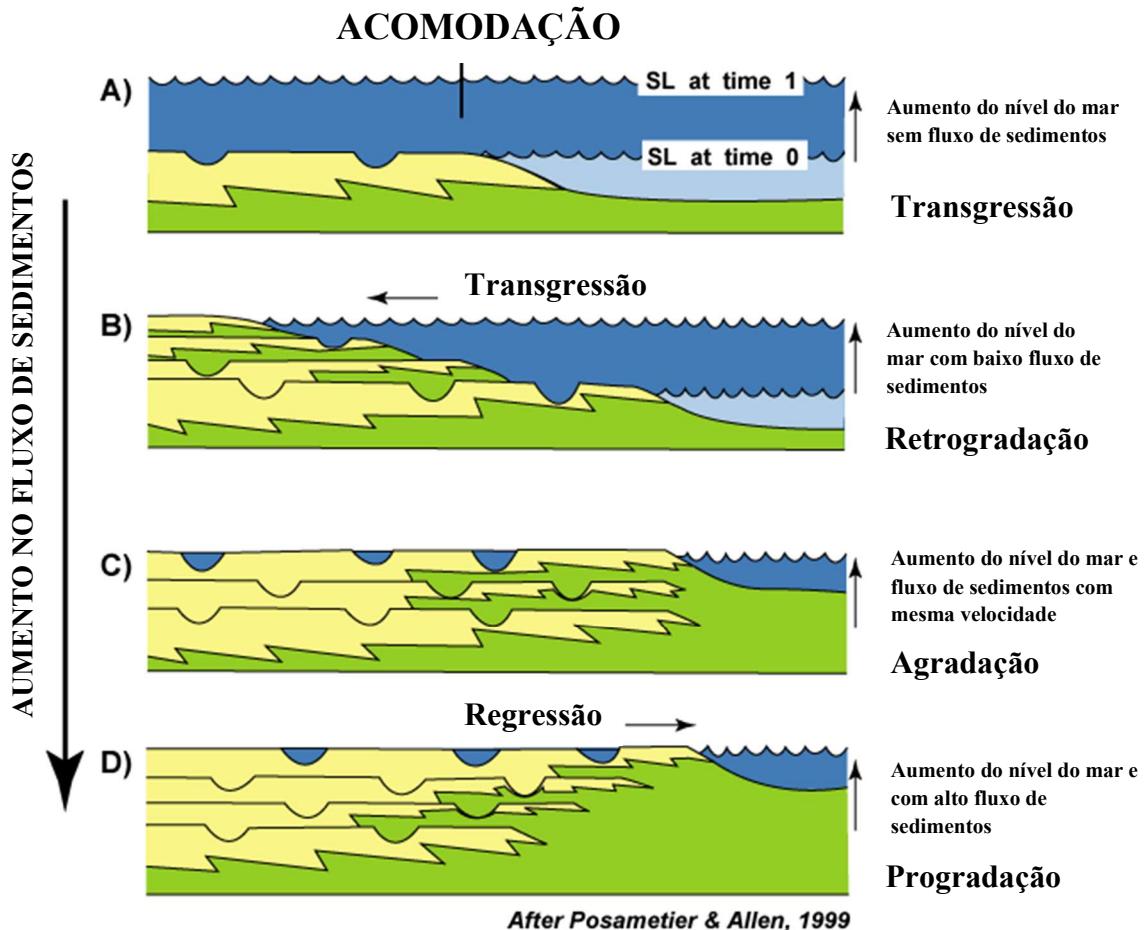
Figura 7 – Modelo tridimensional de fácies de uma barreira costeira em progressão.



Fonte: (SHULTZ et al., 2017).

“Progradação” refere-se ao sistema costeiro que migra em direção ao mar, devido ao fornecimento abundante de sedimentos, à queda do nível do mar, ou ambos (o inverso é referido como “retrogradação”). Observe os “lençóis” das praias das ilhas-barreira, os “lóbulos” dos deltas das marés vazantes, o “preenchimento empilhado e amalgamado do canal” e o “cascalho” dos arenitos espalhados pela lavagem. Cada subambiente possui tendências verticais correspondentes de granulometria. A escala foi omitida intencionalmente, pois existe uma variedade de escalas para cada subambiente. Este modelo de deposição se aplica a muitos locais de remediação localizados em áreas costeiras das costas do Atlântico e do Golfo dos Estados Unidos, bem como em regiões costeiras em todo o mundo (SHULTZ et al., 2017).

Figura 8 – Acomodação impulsionada pela variação do nível do mar e aporte de sedimentos.



Fonte: <http://www.sepstrata.org/page.aspx?pageid=410&3>

5.7. Aplicação da Estratigrafia Ambiental de Sequência - EAS

SHULTZ et al., (2017) propõem uma metodologia de aplicação da estratigrafia ambiental de sequências a qual se inicia com a compreensão do ambiente deposicional e o uso de dados litológicos existentes para identificar padrões granulométricos dos sedimentos e a divide em três fases:

Fase 1: Sintetizar o cenário geológico e deposicional com base na geologia regional e identificar modelos de fácies que sejam aplicáveis ao local. Concentra-se no desenvolvimento de uma compreensão completa dos ambientes deposicionais presentes, identificando modelos de fácies aplicáveis, através dos quais a estrutura HSU pode ser avaliada e desenvolvendo uma conceituação da série de eventos erosivos e deposicionais que formaram o aquífero.

A geomorfologia de acidentes geográficos modernos pode indicar a presença de HSUs. Imagens de satélites e mapas geológicos são de extrema importância na interpretação das condições subterrâneas em ambientes deposicionais costeiros (SHULTZ et al., 2017). Também incluiria aqui os ambientes deposicionais fluviais.

A análise da Fase 1 concentra-se na identificação dos recursos existentes para desenvolver uma compreensão mais profunda dos ambientes deposicionais presentes e na identificação de modelos de fácies aplicáveis contra os quais a estrutura UHE pode ser avaliada. Na conclusão da Fase 1, as equipes do projeto documentarão as principais conclusões e hipóteses de trabalho (SHULTZ et al., 2017). De acordo com o autor este trabalho inclui, mas não se limita, fontes de informação geológica, interpretação de ambientes deposicionais, seleção preliminar de análogos e modelos de fácies, dimensões esperadas e tipos de heterogeneidades observadas (por exemplo, ocorrência e escala do canal) e resolução de dados necessária para avaliar heterogeneidades observadas e previstas a partir de modelos de fácies.

Fase 2: Revisar o MCL existente e os dados de litologia do local baseado nas informações levantadas na Fase 1 e formatar os dados de litologia existentes e identificar padrões verticais de granulometria (sequências) como base para correlações que respeitam as “regras práticas” estratigráficas (apresentadas posteriormente) (SHULTZ et al., 2017).

A Fase 2 concentra-se na formatação de conjuntos de dados litológicos existentes para representar com precisão a densidade dos dados, a resolução vertical e as tendências verticais e laterais de granulometria. Embora, em geral, se espere que unidades de arenosas tenham maior

permeabilidade, outras características, como a classificação, podem ter uma influência significativa na permeabilidade. Essas classificações são observadas em perfis verticais (SHULTZ et al., 2017). É esperada uma maior permeabilidade nos depósitos bem selecionados (mal classificados). Tais padrões podem ser tão importantes quanto as diferenças na granulometria e devem ser considerados (SHULTZ et al., 2017).

A formatação de conjuntos de dados litológicos legados de uma forma que enfatize as tendências relativas de granulometria vertical, conforme descrito aqui, serve para normalizar conjuntos de dados litológicos aparentemente inconsistentes (SHULTZ et al., 2017).

Atualmente os dados de sondagens executadas para estudos ambientais são simplificadas e não fornecem uma seção vertical precisa com indicações verticais de granulometria.

No entanto, para maximizar o valor dos dados litológicos existentes para interpretação estratigráfica, os dados de perfil de poço podem ser formatados como perfis gráficos para enfatizar padrões verticais de granulometria. São construídos traçando o tamanho máximo de grão descrito no perfil de sondagem. Quanto mais grosso mais afastados do eixo e a mesma coisa ao inverso, os silte e argilas ficam mais próximas do eixo. Como o tamanho máximo do grão fornece uma estimativa do nível de energia (por exemplo, velocidade atual) no sistema deposicional, isso fornece um indicador superior de ambientes deposicionais (SHULTZ et al., 2017).

Na figura 09 é apresenta uma seção geológica preparado a partir de dados de registro de sondagens para enfatizar as tendências verticais de granulometria. Duas sequências de grano decrescência ascendente representando ciclos de preenchimento de canal são visíveis neste registro, e não podem ser visualizados nos “registros de faixa” tradicionais, como classificação da USCS. Dois ciclos de preenchimento de canal são correlacionados na seção transversal inferior do ESS (c) para definir a ocorrência do canal. Observe que essas características do canal não são aparentes na seção baseada em USCS (b) e não seriam identificadas por algoritmos de krigagem (interpolação de dados). Quando avaliados na seção baseada em EAS (ESS) (Figura 9c), os dois ciclos de preenchimento do canal se correlacionam com as sondagens próximas e ajudam a definir canais preenchidos com areia e cascalho. Esses canais fornecem caminhos preferenciais de zonas de transporte de contaminantes e representam um ponto de partida para o mapeamento do canal. Utilizando seções geológicas baseadas no USCS, tais padrões não são

visíveis e as características do canal não foram identificadas anteriormente no local. (SHULTZ et al., 2017).

Como conclusão da Fase 2 se terá a identificação de dados litológicos, revisados quanto à qualidade, métodos de perfuração, resolução de dados e consistência e se terá criado um número suficiente de registros gráficos de granulometria de grão para identificar tendências granulométricas. Também desenvolve-se ideias sobre ambientes deposicionais, graus e orientações de heterogeneidade e o seu potencial para impactar o fluxo das águas subterrâneas e a migração de contaminantes.

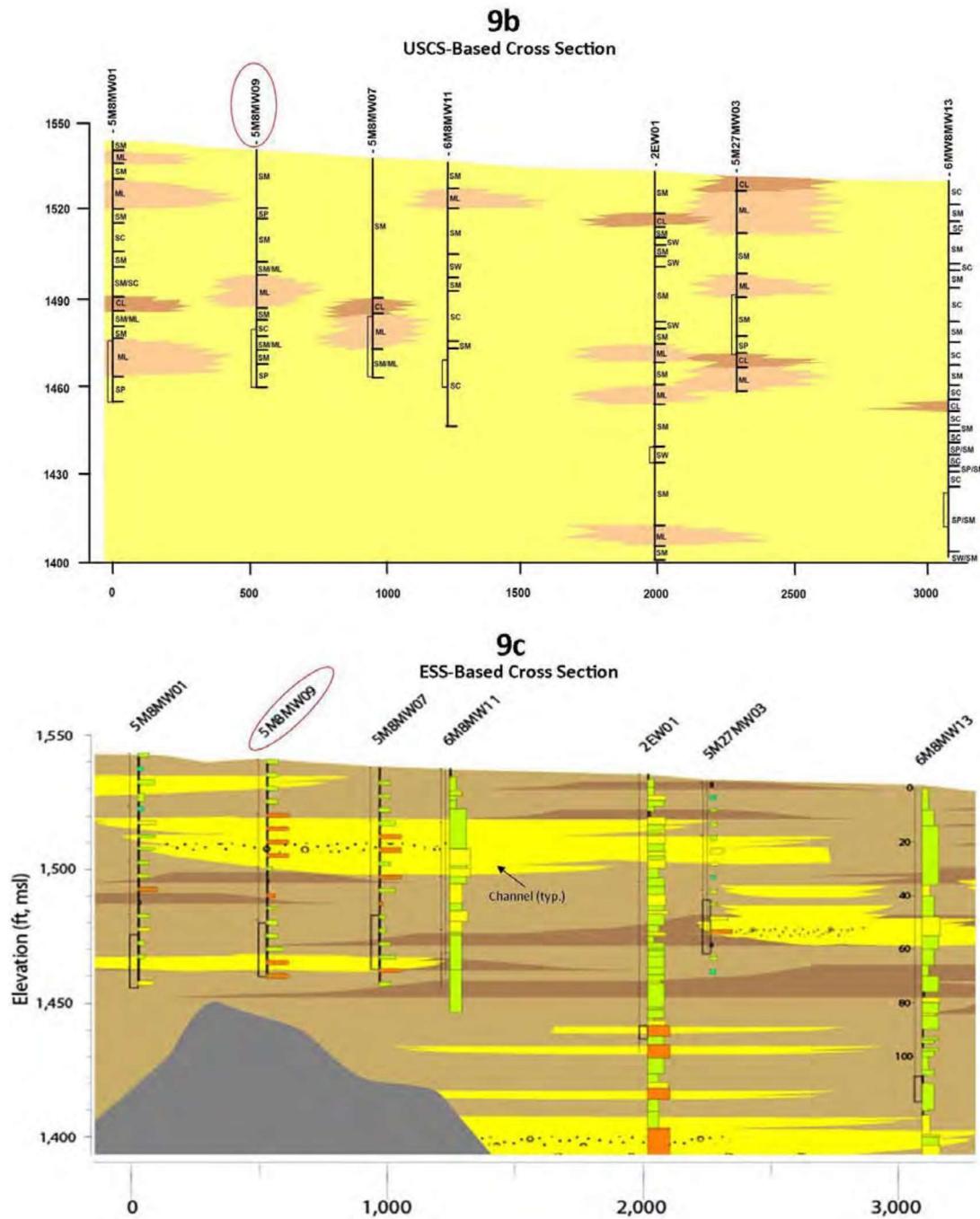
Fase 3: Construir um MCL hidro estratigráfico composto por mapas e seções transversais que representem as HSUs presentes como base para integrar e confrontar a hidrogeologia (por exemplo, níveis de água, teste de bombeamento, teste de slug) e dados químicos (como por exemplo, composição química e mineralógica, concentrações).

Com uma compreensão detalhada dos dados de litologia do local e tendências de granulometria em sondagens obtidos durante a Fase 2, a Fase 3 é a etapa de integração e interpretação de dados que visa a identificação de elementos deposicionais que podem compreender HSUs. As HSUs candidatas podem ser testadas e validadas integrando dados de hidrogeologia e dados químicos de águas subterrâneas (SHULTZ et al., 2017).

Cria-se uma série de seções geológicas, identificando HSUs candidatas e suas superfícies delimitadoras, tentando mapear essas unidades em três dimensões e analisando os níveis de água e os resultados analíticos no contexto da interpretação de trabalho. Este é um processo iterativo, chegando ao melhor ajuste entre todos os dados.

As seções transversais em MCLs tradicionais são normalmente orientadas paralelamente e perpendicularmente ao gradiente geral das águas subterrâneas e através de áreas de fontes contaminantes (SHULTZ et al., 2017). No entanto, as seções transversais orientadas paralelamente e perpendicularmente às tendências de deposição identificadas na Fase 1 também são valiosas no que diz respeito ao destino e transporte dos contaminantes. Por exemplo, num ambiente de fluxo trançado, as seções transversais devem ser orientadas paralelamente e perpendicularmente às orientações do canal, que não necessariamente é a direção do gradiente hidráulico da água subterrânea.

Figura 9 – Registros gráficos de granulometria para definir ocorrências de depósitos de canais.



Fonte: (SHULTZ et al., 2017).

À medida que as seções transversais são construídas e as HSUs candidatas são identificadas, seções transversais e mapas adicionais podem ser necessários para validar a interpretação. Os mapas necessários podem incluir mapas de fácies, que são conjuntos particular de atributos sedimentares característicos como litologia, textura, grupo e estruturas

sedimentares, conteúdo fossilífero, cor, geometria, padrão de paleocorrentes, etc, mostrando mudanças laterais dentro de HSUs, mapas de isópacas (mesma espessura), mapas de continuidade de argila ou paleossolo ou outros mapas dependendo das condições locais. Integração de outros dados disponíveis (por exemplo, dados de hidrogeologia e química de águas subterrâneas) no contexto do ambiente deposicional fornecem as múltiplas linhas de evidência para uma interpretação geologicamente defensável da HSUs (SHULTZ et al., 2017).

CRAMER et al. (2017) faz o uso da EAS como ferramenta de investigação ambiental para indicar fontes de contaminação por solventes clorados no Vale do Silício, Califórnia, Estados Unidos. Em uma seção transversal ao eixo do canal o autor mapeou duas HSUs (HSU 1 e HSU 2), com areia e cascalho, indicados por contornos amarelos. Observa-se que as larguras e a morfologia dos canais representadas nas seções transversais são limitadas pelo mapeamento de fácies tridimensional dos complexos de canais e depósitos de várzea (Figura 10). No mesmo estudo CRAMER et al., 2017, relacionou assinaturas geoquímicas dos contaminantes correspondentes a amostras de água subterrânea em duas seções geológicas orientadas ao longo dos eixos dos canais HSU 1 e HSU 2 com gráficos de assinaturas geoquímicas que mostram o registro da concentração dos diferentes contaminantes indicadores e, como tal, são úteis para discernir os constituintes (Figura 11). Os gráficos com assinaturas geoquímicas representam um valor médio das concentrações nos últimos cinco anos.

SHULTZ et al., 2017, citam uma metodologia de interpretação e “Regras Práticas” Estratigráficas. Embora não haja substituto para a experiência na aplicação de modelos de fácies e estratigrafia de sequência para uma interpretação estratigráfica precisa, as seguintes “regras práticas” generalizadas são apresentadas para ajudar os profissionais da comunidade de remediação de águas subterrâneas a melhorar as correlações e previsões do subsolo (SHULTZ et al., 2017), que de acordo com o autor são:

- Identificar um conjunto de modelos de fácies aplicáveis para um local específico e usá-los como guia na correlação de unidades de granulometria arenosa. Interpretar elementos deposicionais (por exemplo, eixo do canal, margem etc.) como UHSs potenciais e definir os critérios usados para classificar os elementos. Desenvolva hipóteses sobre as condições específicas do local e como elas podem fazer com que a estratigrafia do local varie dos modelos de fácies identificados.
- Padrões verticais de granulometria são indicativos do nível de energia relativo presente no ambiente deposicional e, portanto, são melhores indicações de unidades correlativas do que

topos ou bases de unidades de areia. Material mais grosso é depositado na base e mais fino em cima, e isto é importante avaliar a hora de descrever as camadas que aparentemente possuem a mesma granulometria.

Os aquíferos são geralmente correlacionados de forma litoestratigráfica “de cima para baixo”; no entanto, os sedimentos foram originalmente depositados de baixo para cima, ou de forma deslocada lateralmente são frequentemente erodidos por unidades mais jovens. Assim, um modelo conceitual de como ocorreram os eventos de sedimentação e erosão é necessário para uma correlação estratigráfica precisa.

- Correlacione primeiro as unidades de argila. Em ambientes fluviais “canalizados”, as bases dos canais são frequentemente erosivas e irregulares em elevação, enquanto as argilas das planícies aluviais e os paleossolos que cobrem as sequências dos canais tendem a ser mais horizontais. Contudo, em alguns casos, canais cheios de argila podem ser encontrados como resultado do abandono do canal e do preenchimento passivo por materiais de granulação fina. Isto é especialmente prevalente em depósitos de rios sinuosos ou meandrantes. Os paleossolos normalmente formam-se dentro de depósitos de planícies aluviais e formam marcadores de correlação superiores com bases ou topes de areias de canais individuais, e são provavelmente contínuos em grandes áreas.

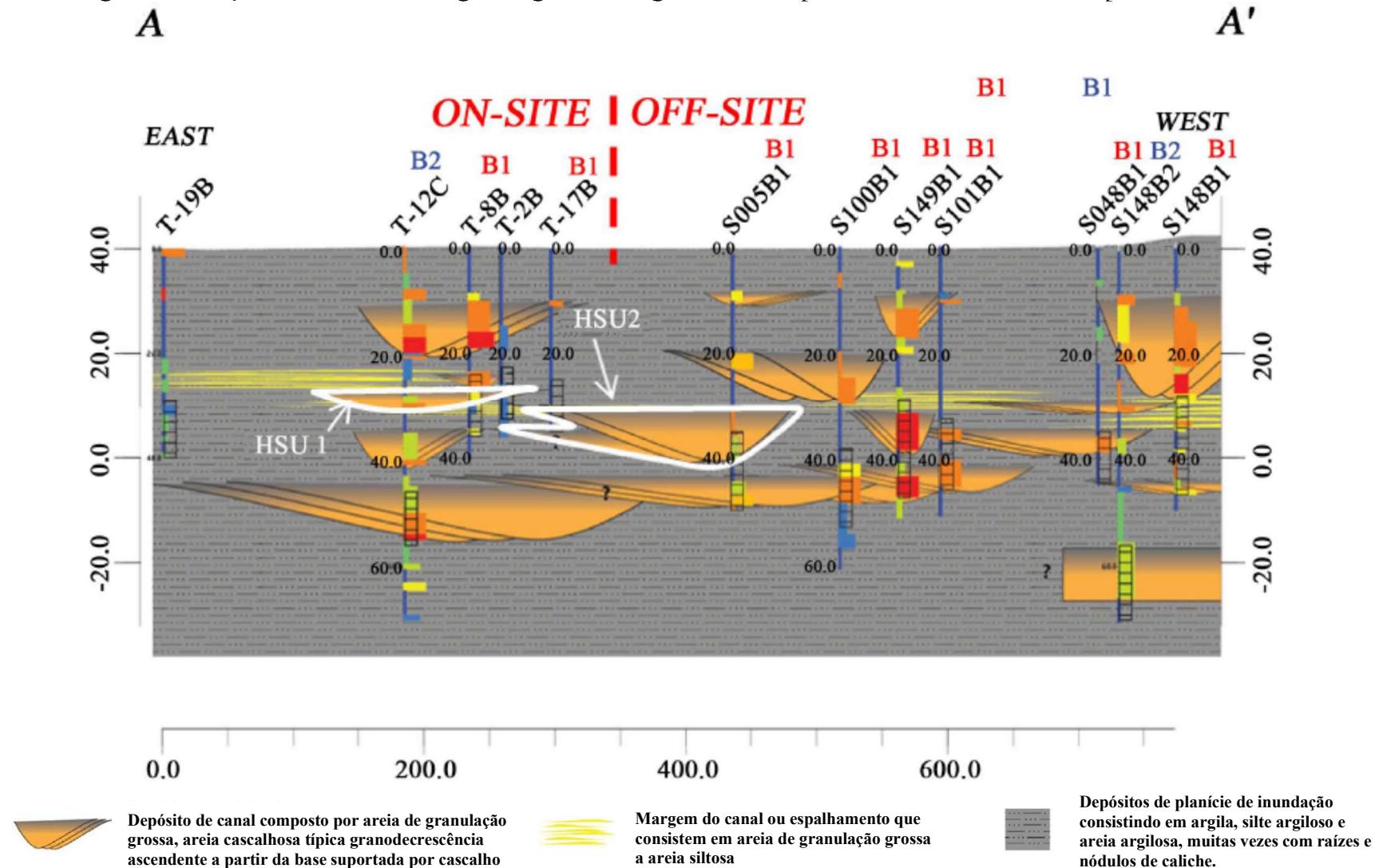
- Para depósitos de canais, identificar as bases dos canais que são geralmente erosivas e irregulares na topografia, e que contêm a fração de tamanho de grão mais grosso presente no sistema global, representando potenciais zonas de alta permeabilidade que podem transportar uma grande proporção da água subterrânea e da massa contaminante, através de uma percentagem muito pequena da área transversal total. As bases dos complexos de canais têm maior probabilidade de serem conectadas hidráulicamente do que a porção superior dos depósitos de canais individuais.

- Sistemas de canais que são caracterizados por um teor geral de argila relativamente alto (por exemplo, sistemas fluviais sinuosos) são provavelmente mais compartimentados do que ricos em areia (por exemplo, sistemas trançados) e correlações de pacotes de canais podem, portanto, ter maior incerteza. Canais abandonados cheios de argila, ou “tampões”, resultantes de meandros cortados, são comuns em sistemas sinuosos. Estas características arqueadas podem servir como barreiras ao fluxo das águas subterrâneas e podem afetar dramaticamente os gradientes hidráulicos e o fluxo da água subterrânea.

- O grau de heterogeneidade litológica (acamamento) observado num perfil vertical é geralmente um bom indicador de primeira passagem da heterogeneidade lateral. No entanto, finos leitos de argila presentes num sistema aquífero rico em areia podem ser lateralmente contínuos por longas distâncias (centenas a milhares de pés ou mais) e podem formar barreiras eficazes ao fluxo das águas subterrâneas. O potencial de presença de argilas finas e lateralmente contínuas é alto em áreas marinhas marginais, lagos tipo *play lake*, margens fluviais e depósitos glacio-lacustres.

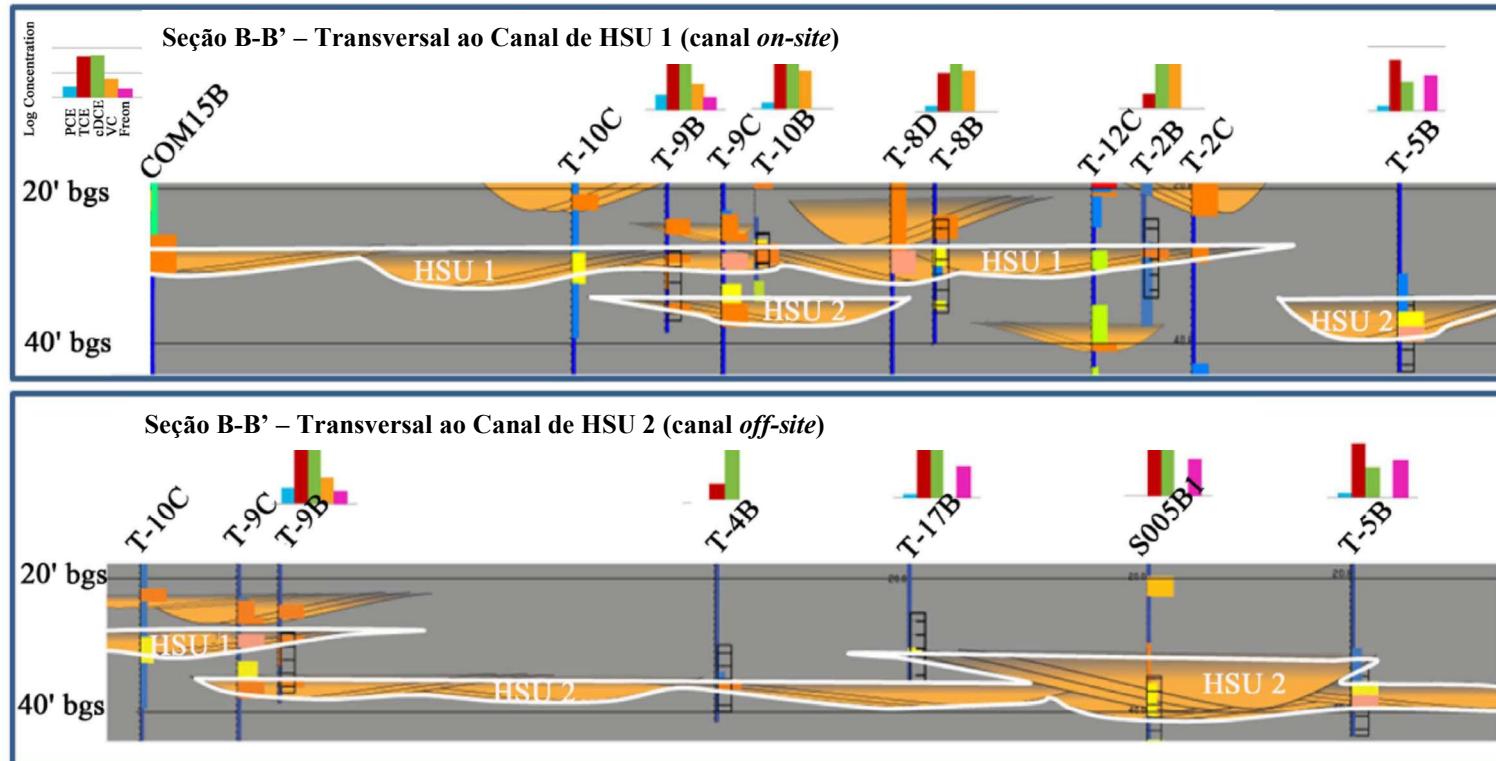
- Nas zonas costeiras, durante os níveis relativamente elevados do nível do mar, os vales incisos do Golfo e da costa atlântica dos Estados Unidos foram inundados por águas marinhas. Isto fez com que os ambientes de deposição se deslocassem para o interior e resultou na formação de depósitos de argila marinha lateralmente contínuos, referidos como superfícies de inundação máxima. Estas superfícies de inundação máxima podem ser identificadas por contagens elevadas de raios gama e argilas relativamente puras e têm elevado potencial para compartimentar aquíferos em vales incisos.

Figura 10 – Seção transversal com registros gráficos de granulometria para definir ocorrências de depósitos de canais.



Fonte: CRAMER et al., 2017

Figura 11 – Seções com registros gráficos de granulometria e impressões digitais de contaminantes.



Fonte: CRAMER et al., 2017

- Unidades de argila correlacionadas de uma forma que mostre "empilhamento" ou topografia positiva são suspeitas, a menos que a deformação tectônica tenha impactado o local, ou tenha ocorrido soterramento profundo e extensa compactação da sequência sedimentar, o que pode levar a "dobras de compactação" resultantes de argilas serem mais propensas à compactação do que areias.

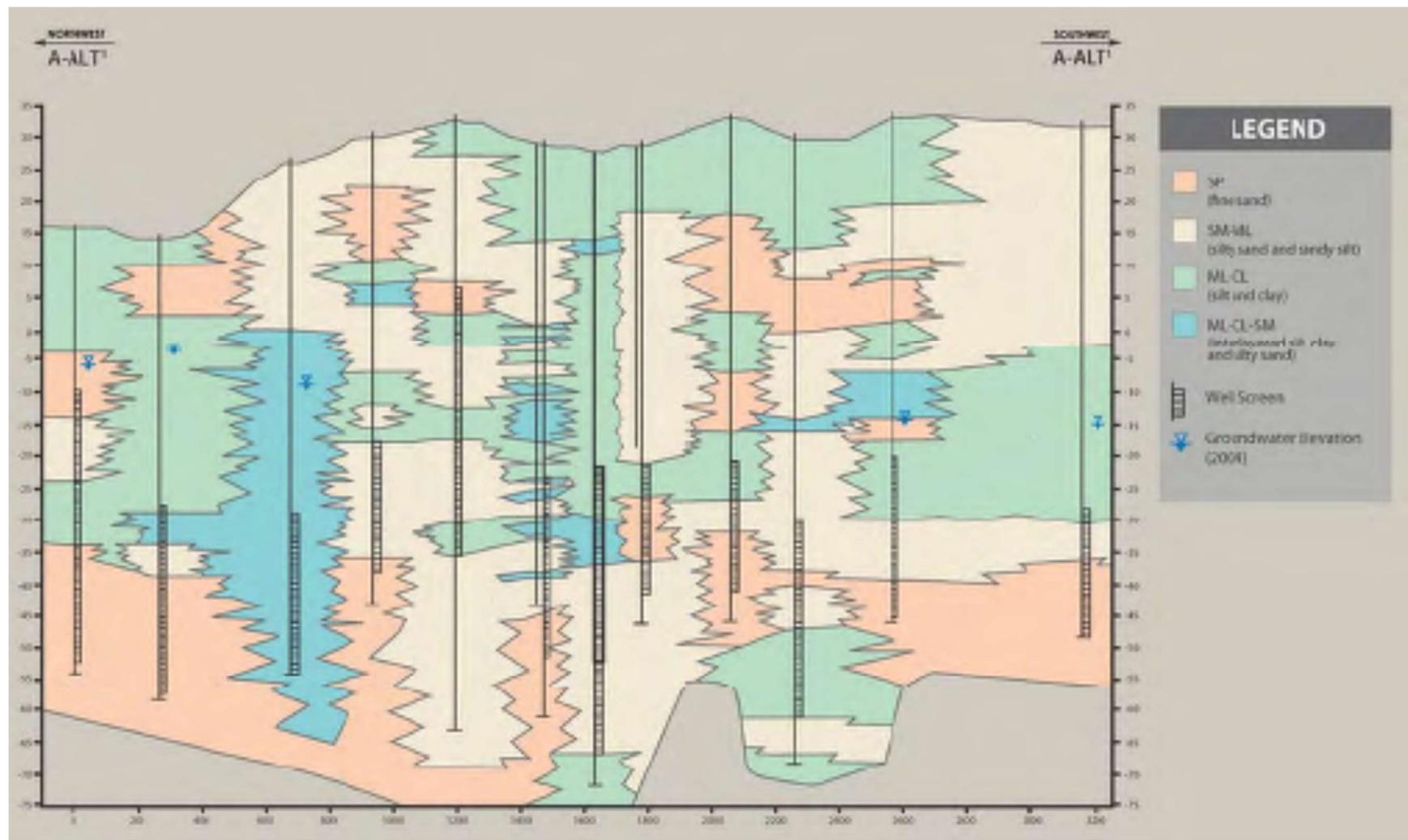
- O empilhamento vertical de fácies ou "pilares" (ver Figura 12) é um erro comum em MCLs de águas subterrâneas e resultados da variabilidade na qualidade dos dados de perfilagem de sondagem (por exemplo, um geólogo pode registrar uma fácie como SM e outro pode registrar a mesma fácie como SP). Alguns intérpretes podem interpretar essas informações literalmente, sem considerar o potencial de viés de registro e, portanto, podem colocar uma mudança de fácie entre cada poço, resultando em uma interpretação de fácie no estilo "pilar". Tal interpretação não é geológica e tem valor limitado na compreensão das condições do subsolo ou no planejamento da remediação.

A figura 12 Seção transversal mostrando um erro comum na correlação de dados de subsuperfície. Padrões de fácie verticais interpretados ("pilares") correspondentes a localizações de poços individuais com mudanças de fácie interdigitadas lateralmente. Esta seção transversal reflete preconceitos na classificação do USCS entre diferentes geólogos ou anos de coleta de dados, não é geologicamente defensável e tem utilidade extremamente limitada na compreensão das condições do subsolo (SHULTZ et al., 2017).

A definição da HSU inclui a integração de dados hidrogeológicos e químicos, que fornecem mais evidências da continuidade hidráulica. Este processo iterativo interroga e refina ainda mais o MCLs com múltiplas linhas de evidência. A interpretação da UHE é revisada e refinada à medida que dados adicionais do local são coletados e atualizados conforme necessário para serem consistentes com todos os dados disponíveis

De acordo com (SHULTZ et al., 2017) ao final da Fase 3 se terá: uma melhor compreensão das tendências verticais e laterais na granulometria e uma compreensão clara dos tipos e resolução de dados litológicos existentes; uma rede de seções transversais correlacionadas que se unem em três dimensões, consistente com os modelos de fácie aplicáveis ao local; candidato identificado e mapeado HSUs como base para a integração de dados hidrogeológicos e químicos para validar o seu impacto no fluxo das águas subterrâneas e no destino e transporte de contaminantes.

Figura 12 – Seção transversal mostrando um erro comum na correlação de dados de subsuperfície.



Fonte: (SHULTZ et al., 2017)

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Embora as técnicas de EAS terem sido aplicadas à remediação de águas subterrâneas e estudos de recursos hídricos desde a década de 1990 (CRAMER et al., 2017), no Brasil dificilmente encontrará algum estudo referente à Investigação e Remediação de Áreas Contaminadas que a utilize-a.

Os métodos estratigráficos avançados utilizados para a compreensão da heterogeneidade oferecem uma excelente ferramenta na compreensão de que cada ambiente deposicional possui processos característicos que atuam no transporte, depósito e preservação de sedimentos e, portanto, deixam tendências características de granulometria vertical e lateral no registro sedimentar. Uma correta avaliação dos ambientes deposicionais correspondentes a um determinado aquífero permite que muitas previsões sejam feitas em relação às heterogeneidades e atua como um guia para a correlação de dados subterrâneos.

A aplicação do EAS fornece uma ferramenta de investigação ambiental baseada na geologia, e sua abordagem representa um recurso indispensável para avaliação de locais complexos de águas subterrâneas contaminadas e exemplifica porque uma compreensão detalhada da geologia subterrânea é imprescindível para distinguir áreas de origem potenciais e caminhos hidro estratigráficos.

O Sistema Unificado de Classificação de Solos (USCS) tradicionalmente utilizado para usado para descrever depósitos sedimentares de locais contaminados. No entanto USCS foi desenvolvido para investigação geotécnica e está focado nas propriedades de engenharia do solo e tem uso limitado para identificar processos deposicionais ou ambientes registrados nos estratos. Uma descrição de estratos “baseada em fácies” concentra-se nas características deposicionais e fornece uma maneira melhor de interpretar processos e ambientes deposicionais.

Embora os métodos de perfuração comumente usados em investigações ambientais possam perturbar os materiais, raspar a superfície com uma faca e/ou pulverizar o testemunho com uma garrafa de água tipo spray geralmente permite uma visão mais clara das características sedimentológicas, como laminações, estratificação cruzada, grau de intercalação e espessura do leito, etc. Uma “descrição baseada em fácies” dos materiais principais inclui informações que podem ser usadas para determinar processos deposicionais.

Descrições baseadas em fácies fornecem identificação das características deposicionais que podem ser usadas para interpretar ambientes deposicionais.

Exibições gráficas tridimensionais de dados subterrâneos geradas por computador são uma importante ferramenta de visualização e interrogação de dados, mas não devem ser confundidas com um modelo conceitual de local.

Dados litológicos de alta resolução são valiosos para a caracterização do local, mas recomenda-se que sejam interpretados no contexto dos ambientes deposicionais e que as seções geológicas sejam construídas por geólogos, e não por software de computador.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CRAMER, R. S., LU, J., SHULTZ, M. R., PLANK, C., LEVINE, H., Use of Environmental Sequence Stratigraphy (ESS) as an Environmental Forensic Tool to Identify Chlorinated Solvent Sources at a Complex Site in Silicon Valley, California. **Journal of Environmental Protection**, vol. 9, p. 554-566, 2018.
- LANG, S.C., GRECH, P., Grech, ROOT, R., HILL, A., HARRISON, D. The Application Of Sequence Stratigraphy To Exploration And Reservoir Development In The Cooper-Eromanga-Bowen-Surat Basin System. **The APPEA Journal**, vol. 200, p. 223-249, 2021.
- MIALL, A.D., **Principles of Sedimentary Basin Analysis**. 3. ED. Springer-Verlag, Berlin, 616 p. 2000.
- READING, H. G., **Sedimentary Environments: Process, Facies and Stratigraphy**. Blackwell Science, 688p., 1996.
- SHULTZ, M. R., CRAMER, R. S., PLANK, C., LEVINE, H., EHMANN, K. D. A Practical Guide for Applying Environmental Sequence Stratigraphy to Improve Conceptual Site Models. **U. S. EPA – Groundwater Issue**, EPA/600-R-17/293, 82p., 2017.
- TEIXEIRA, W., FAIRCHILD, T. R., TOLEDO, M. C. M. DE, TAIOLI, F. **Decifrando a Terra**, 2. Ed. São Paulo. IBEP Editora Nacional-Conrad, 623p., 2009.
- VAIL, P. R., MITCHUM, R. M., & THOMPSON, S. III. **Seismic stratigraphy and global changes of sea level**. In C. E. PAYTON, Seismic stratigraphy—Applications to hydrocarbon exploration (pp. 49-212). American Association of Petroleum Geologists Memoir 26, 1977.