



C A P Í T U L O 3

DINÂMICA DA CIRCULAÇÃO SANGUÍNEA PULMONAR

Neire Moura de Gouveia

Estevão Couto Vinhal

Tiago Henrique Souza Nobre

A circulação sanguínea dos pulmões guarda notável peculiaridade se comparada ao que é visto no restante dos órgãos humanos. Primeiramente, em função de possuir dois padrões circulatórios completamente distintos: a circulação para nutrição do próprio tecido pulmonar (como parte da circulação sistêmica, ou “grande circulação”) e a circulação para oxigenação do sangue venoso utilizado por todo o organismo (como parte da circulação pulmonar, ou “pequena circulação”). Em segundo lugar, por ser dotada de uma característica exclusiva em relação ao comportamento de constrição ou dilatação arteriolar frente à hipóxia. Por fim, é sujeita a importantes influências mecânico-gravitacionais que podem tanto auxiliar quanto dificultar seu fluxo.

Tópicos a serem abordados:

- Os padrões circulatórios pulmonares;
- Os efeitos da pressão hidrostática sobre a pressão arterial pulmonar e sua relação com as zonas de West;
- As zonas de West;
- Caso clínico: pneumonia.

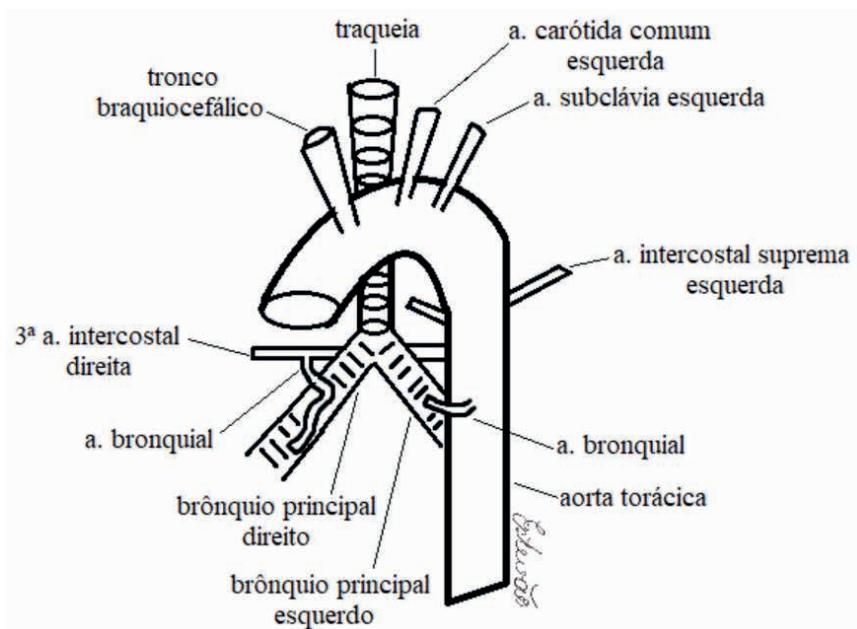
OS PADRÕES CIRCULATÓRIOS PULMONARES:

A dinâmica do fluxo sanguíneo pulmonar ocorre por dois padrões circulatórios distintos: a circulação para oxigenação do sangue venoso e a circulação para nutrição de seu próprio tecido (parênquima e estroma pulmonares).

I. Circulação para oxigenação do sangue venoso: de alto fluxo e baixa pressão, conduz o sangue venoso utilizado por todo o corpo, impelido pelo ventrículo direito até a artéria pulmonar e seus ramos ao longo de toda a árvore brônquica, culminando nos alvéolos pulmonares para a remoção de CO_2 e adição de O_2 (oxigenação/troca gasosa/hematose). O sangue, após a oxigenação, retorna ao coração por meio das veias pulmonares ao ventrículo esquerdo, e finalmente, à circulação sistêmica via artéria aorta. Constitui a conhecida “circulação pulmonar”, ou “pequena circulação”.

II. Circulação para nutrição própria: de baixo fluxo e alta pressão, conduz sangue arterial, bem oxigenado, para sustentar o próprio tecido pulmonar (parênquima: tecido especializado do pulmão, constituído pela árvore brônquica e alvéolos. Estroma: tecido de suporte ao parênquima, constituído pelo tecido conjuntivo, vasos sanguíneos, vasos linfáticos e ineração). É emanado pelo ventrículo esquerdo às artérias bronquiais (figura 11), ramos diretos da artéria aorta torácica e da 3^a artéria intercostal direita, que fornecem sangue para manter o próprio pulmão vivo. Tardiamente à utilização do sangue pelo tecido pulmonar, este retorna coração a partir das veias bronquiais. É parte da circulação sistêmica (“grande circulação”), a mesma que nutre todo o restante do corpo.

Figura 11 - Artérias e veias bronquiais: relacionadas ao padrão circulatório para nutrição própria do pulmão



Fonte: autoria própria

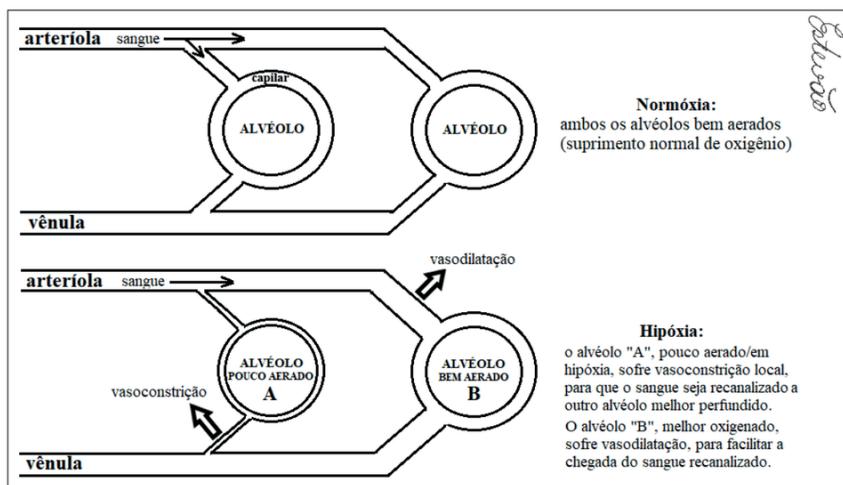
Após explanados os dois padrões circulatórios relacionados ao pulmão, observa-se que aquele relacionado à fisiologia respiratória em si, é o aqui referido como “circulação para oxigenação do sangue venoso”, pois é esse o padrão envolvido na função elementar do órgão: a troca gasosa alveolar partir da ventilação (isto é, a oxigenação do sangue/hematose). Por isso, é dele que trataremos nos próximos parágrafos. Porém, o conhecimento de que o padrão circulatório responsável pela nutrição do próprio pulmão é diferente do relacionado à troca gasosa fez-se imprescindível, visto que as artérias brônquicas são estruturas anatômicas pouco citadas nos livros-texto em geral, e não raramente, é geratriz de confusão, dado que muitos leitores, a princípio, comumente imaginam que o mesmo sangue proveniente da artéria pulmonar seria também o responsável pela nutrição do órgão.

O PADRÃO DE DISTRIBUIÇÃO SANGUÍNEA ALVEOLAR FRENTE À HIPÓXIA:

Na circulação sistêmica, em situações de hipóxia (sangue pouco oxigenado), as artérias e arteríolas tendem a sofrer dilatação, visando facilitar, a todo custo, o fluxo e alcance de oxigênio aos tecidos num cenário de escassez. Na circulação pulmonar para oxigenação do sangue, porém, o padrão da distribuição sanguínea alveolar ocorre de maneira contrária ao observado nos vasos sistêmicos: os ramos da artéria pulmonar que estiverem contato com alvéolos pouco oxigenados tendem a sofrer vasoconstricção, figura 12 (ao contrário da dilatação observada sistemicamente), enquanto os que estiverem próximos de alvéolos bem aerados tendem a sofrer vasodilatação (visando o aumento do fluxo). Isso se torna compreensível quando concluímos que, para o pulmão, é mais proveitoso direcionar o sangue desoxigenado para alvéolos que estiverem bem aerados (alvéolo bem aerado: de ampla abertura e enchimento aéreo, possuindo, então, boa oxigenação), do que para alvéolos pouco oxigenados (pouco aerados), pois, o objetivo primário do órgão é, justamente, oxigenar esse líquido biológico. Logo, não haveria propósito algum para um sangue já desoxigenado, manter contato com alvéolos também pouco aerados, que não ofereciam nenhum subsídio para a uma troca gasosa efetiva.

Assim, fica evidente que o mecanismo de vasoconstricção frente a alvéolos pouco aerados é um útil mecanismo de adaptação pulmonar para otimizar sua função. A base molecular para a ocorrência de tal fenômeno é, atualmente, explicada por dois fatores: quando em hipóxia (por alvéolos pouco aerados), as arteríolas pulmonares que irrigam a região daqueles alvéolos tendem a aumentar sua sensibilidade pela endotelina (um vasoconstritor), assim como, por características próprias do endotélio pulmonar, tendem a reduzir a liberação de óxido nítrico (um vasodilatador). Em suma, o endotélio pulmonar, próximo a alvéolos pouco aerados, torna-se mais sensível a vasoconstritores e reduz a produção de vasodilatadores.

Figura 12 – Alvéolos pouco oxigenados induzem a vasoconstricção enquanto alvéolos bem oxigenados levam à vasodilatação



Fonte: autoria própria

OS EFEITOS DA PRESSÃO HIDROSTÁTICA SOBRE A PRESSÃO ARTERIAL PULMONAR E SUA RELAÇÃO COM AS ZONAS DE WEST:

A pressão hidrostática é a força exercida pela gravidade frente aos líquidos, de modo que, quanto mais próximo do solo, maior será essa pressão.

Nos pulmões, convém ressaltar que, com o indivíduo em ortostase (de pé) os valores normais de pressão da artéria pulmonar, ao nível do hilo pulmonar, são, em média, 25 mmHg na sistólica e 8 mmHg na diastólica. Dito isso, a influência da pressão hidrostática é notável a partir das diferenças de pressão arterial pulmonar observadas nas distintas porções do pulmão: no ápice pulmonar (acima do nível do coração), a pressão arterial pulmonar sistólica é de 10 mmHg e a diastólica de 8 mmHg (repare que o valor sistólico, de 10 mmHg, é menor que os 25 mmHg citados anteriormente. Isso ocorre em função dos ápices pulmonares situarem-se acima do coração, assim, os vãos das artérias pulmonares perdem força em razão da necessidade de bombearem sangue para cima). Ao nível do coração e porções inferiores (base de pulmão), contudo, o valor sistólico é de 40 mmHg, e o diastólico de 23 mmHg. Veja que os níveis pressóricos nas bases pulmonares são substancialmente maiores que nos ápices. Isso ocorre por duas causas, ambas relacionadas à gravidade:

- 1) Os ramos das artérias pulmonares, nessas regiões do pulmão, devem irrigar áreas que situam abaixo, não havendo o próprio obstáculo gravitacional observado nos ápices, que situavam acima do coração, exigindo que o sangue fosse bombeado contra a gravidade;
- 2) Quanto mais inferiores são as regiões a serem irrigadas, maior a contribuição da própria gravidade (pressão hidrostática) para auxiliar na irrigação, o que é visto justamente nesses valores, onde a pressão hidrostática contribui com 15 mmHg tanto na sistólica quanto na diastólica para regiões de pulmão ao nível do coração e base (25 mmHg da a. pulmonar + 15 mmHg da pressão hidrostática = 40 mmHg sistólica, por exemplo).

AS ZONAS DE WEST:

Na circulação pulmonar, dentre as entidades pressóricas dignas de nota, não somente existe a pressão arterial pulmonar (citada anteriormente), mas também atua a chamada “pressão aérea alveolar”. Enquanto a pressão arterial pulmonar respondia pelo volume de sangue colidindo contra artérias, arteríolas e capilares pulmonares, a pressão aérea alveolar nada mais é do que a força exercida pelo ar contra a parede dos alvéolos. Os capilares pulmonares, mais precisamente, sofrem influência dessas duas pressões: enquanto a pressão arterial pulmonar tende a mantê-los abertos, a pressão aérea alveolar tende a fechá-los.

Assim, conclui-se que, para que haja circulação pulmonar e ocorrência de troca gasosa, a pressão arterial pulmonar deve sempre ser superior que a pressão aérea pulmonar, para que os capilares se mantenham abertos e o sangue possa alcançar o alvéolo e passar por hematose.

Com isso em mente, John B. West descreveu três possibilidades de padrão de fluxo sanguíneo capilar observáveis em um pulmão, com cada região recebendo o nome de “zona”, variando de 1 a 3, e esses conceitos, num todo, chamados de “Zonas de West”:

- 1) Zona 1: região do pulmão com ausência total de fluxo sanguíneo capilar, com todos os capilares pulmonares fechados, tanto em sístole quanto em diástole. Ocorre somente em circunstâncias patológicas (figura 13).
- 2) Zona 2: região do pulmão com fluxo sanguíneo capilar intermitente (capilares abertos na sístole e fechados na diástole). Ocorre fluxo de sangue na sístole, mas não na diástole. Nesse caso, a pressão arterial pulmonar sistólica é superior à pressão aérea alveolar, mas a diastólica não o é. A zona 2 é fisiológica, e ocorre nos ápices pulmonares do indivíduo saudável em ortostase (figura 13).

3) Zona 3: região do pulmão com fluxo sanguíneo capilar contínuo (capilares pulmonares mantêm-se abertos tanto na sístole quanto na diástole). Ocorre fluxo de sangue em todo o ciclo cardíaco. Aqui, a pressão arterial pulmonar é superior à aérea alveolar em todos os momentos. A zona 3 é fisiológica, e é vista ao nível do coração e bases pulmonares do indivíduo saudável em ortostase, e em todo o pulmão do indivíduo saudável em decúbito dorsal (deitado) ou em exercício físico (figura 13).

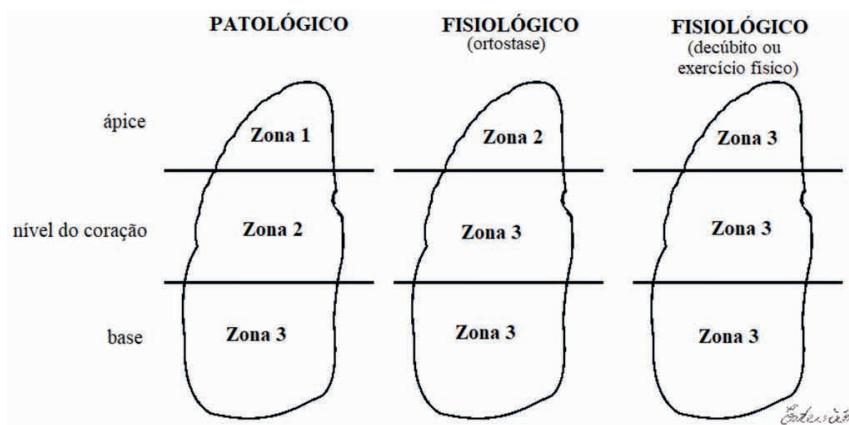
Observe que, num indivíduo saudável, então, jamais existirão momentos de ausência de fluxo sanguíneo em todo o ciclo cardíaco (sístole e diástole). Por isso, a zona 1 é vista somente em manifestações clínicas patológicas (figura 13).

Reflita também que a zona 2 (fluxo sanguíneo intermitente) é vista somente no ápice pulmonar do indivíduo de pé, em função da maior dificuldade para o bombeamento de sangue contra a gravidade, o que acaba reduzindo a pressão arterial pulmonar tanto na sístole quanto na diástole. Embora a pressão sistólica ainda consiga se manter superior, o que é suficiente para manter o fluxo ao menos em sístole, a diastólica (que já é naturalmente menor) termina, nessa situação, inferior à pressão aérea alveolar, configurando, assim, a zona 2: fluxo intermitente, ou seja, somente numa fase do ciclo cardíaco).

Ademais, veja que a zona 3 de West (fluxo sanguíneo contínuo) é vista em três ocasiões:

- I. Na posição ortostática (de pé): em regiões pulmonares ao nível do coração e abaixo (bases);
- II. Na posição de decúbito dorsal (deitado): em todo o pulmão. Aqui, a zona 3 ocorre inclusive nos ápices pulmonares, pois, com o indivíduo deitado, não mais se tem a resistência gravitacional observado quando em ortostase, o que facilita o trabalho dos ramos arteriais em prol da distribuição de sangue;
- III. No exercício físico: em todo o pulmão (figura 13). Em razão do aumento da frequência e força de contração atrial (cronotropismo e inotropismo positivos) que elevam a pressão arterial pulmonar globalmente, o que é capaz de fazer com que até mesmo a pressão diastólica se eleve a um nível superior à pressão aérea alveolar.

Figura 13 – Distribuição das zonas de West em diferentes situações



Fonte: autoria própria

Ao compreender-se as zonas de West chegamos à conclusão de que, teoricamente, quanto maior a porção do pulmão com zonas 3, mais proveitosa será a troca gasosa realizada pelo indivíduo (quer dizer, a hematose: a oxigenação do sangue pelos pulmões), pois o evento poderá ocorrer tanto em sístole quanto em diástole. Exemplo prático disso seria, como mencionado anteriormente, o exercício físico, onde todo o pulmão é constituído por padrão circulatório de zona 3, o que otimiza a oxigenação de um organismo com atividade metabólica muscular esquelética elevada.

Por isso, o conhecimento da natureza circulatória pulmonar sob o padrão de zonas, é hoje útil no contexto clínico, pois permite que a estrutura pulmonar seja manejada visando-se a obtenção da maior porção possível de zonas 3 no pulmão do indivíduo doente, o que aceleraria a sua recuperação ou, ao menos, ofereceria maior conforto.

Caso clínico: pneumonia

Paciente, 45 anos, masculino, portador de hipertensão arterial sistêmica (HAS) e diabetes mellitus (DM) controlados com medicação, história familiar de doença pulmonar obstrutiva crônica e cardiopatia. Deu entrada no pronto atendimento referindo dispneia crescente há 5 dias, associado a sensação febril e indisposição, após contato com familiar com teste rápido positivo para COVID-19 (SARS-CoV-2).

Exame físico: regular estado geral (REG), corado, acianótico, taquicárdico, hipertenso, taquipneico e baixa saturação de oxigênio em ar ambiente.

FC: 125 bpm (referência: 60 a 100 bpm); FR: 22 ipm (referência: 12 a 20 ipm); SatO₂: 87% (referência: 95 a 100%); PA: 135/90 mmgH.

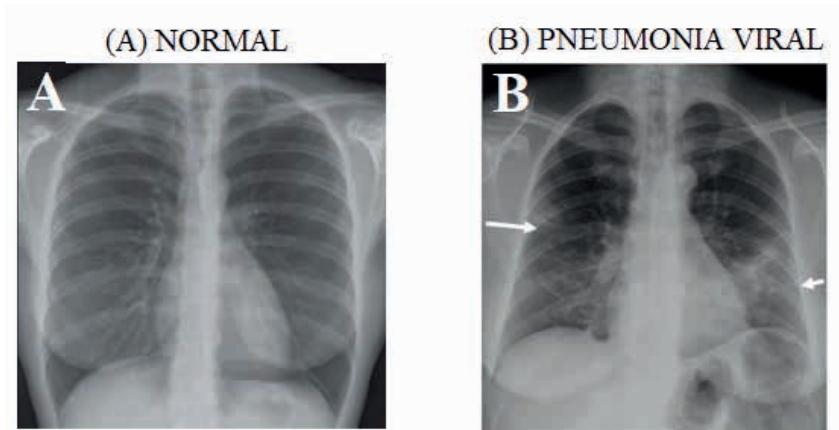
Paciente evolui com piora do quadro, apresentando queda expressiva de saturação de oxigênio para 75% e rebaixamento do nível de consciência, necessitando de oxigênio suplementar, sendo indicado intubação orotraqueal e ventilação artificial.

Exames complementares:

Radiografia de tórax: infiltrados em aspecto vidro fosco em ambos os pulmões, consolidação em lobo médio e base pulmonar esquerda (figura 14, imagem B, setas). Sugestivo de pneumonia viral associada à infecção por COVID-19.

Teste rápido para COVID-19: positivo.

Figura 14 – Radiografia torácica normal vs. achados sugestivos de pneumonia viral



Fonte: imagem A (KLEIN, 2022); imagem B (FELIPE, 2021)

Questões norteadoras

- 1) Quais alterações pulmonares podemos encontrar na pneumonia?
- 2) Qual o padrão de distribuição sanguínea nas regiões pulmonares com alteração?

Respostas

Questão 1:

A alteração pulmonar mais comumente observada na pneumonia é a inflamação dos alvéolos e das vias aéreas, que leva ao acúmulo de exsudato inflamatório (células imunológicas e micro-organismos) nos espaços alveolares, preenchendo especialmente os alvéolos, tornando o tecido pulmonar mais sólido e menos aerado (originando os achados radiográficos de aspecto em vidro fosco e consolidação). Consequentemente ocorre diminuição da elasticidade pulmonar e da troca gasosa resultando em hipoxemia (baixo nível de oxigênio no sangue) e, em casos graves, hipercapnia (acúmulo de dióxido de carbono no sangue). Clinicamente, observa-se aumento do trabalho respiratório (geralmente dispneia) e, comumente, tosse com expectoração.

Questão 2:

Nas regiões com consolidação, haverá um padrão generalizado de vasoconstricção arteriolar visando o redirecionamento do sangue a ser oxigenado para regiões periféricas ao local de maior exsudato inflamatório.

No paciente em questão, as regiões de lobo médio no pulmão direito, e a base pulmonar esquerda estarão com padrão predominantemente vasoconstritivo, enquanto regiões de ápice estarão com um caráter essencialmente vasodilatador, em razão de serem as regiões menos comprometidas pela inflamação resultante.

Questão 3:

Embora a ventilação mecânica seja uma ferramenta essencial no tratamento de disfunções pulmonares, ela pode, sim, trazer riscos e complicações. Dentre alguns, podemos ressaltar: o barotrauma, lesão causada por pressões excessivas nos pulmões; o volutrauma, lesão devido a volumes de ar excessivos entregues aos pulmões; a atelectasia, colapso de partes do pulmão devido a ventilação inadequada de algumas áreas dificultando a troca gasosa; a pneumonia associada à ventilação (PAV), principalmente em pacientes sob ventilação mecânica prolongada; o desequilíbrio de gases, levando a hipoxemia ou hipercapnia se os parâmetros da ventilação não forem ajustados corretamente; e disfunções hemodinâmicas, pois a pressão intratorácica podem impactar negativamente o retorno venoso e o débito cardíaco.

REFERÊNCIAS

- 1 - AIRES, Margarida de M. **Fisiologia**, 5. ed. Rio de Janeiro: Grupo GEN, 2018. 1359 p.
- 2 - AZEREDO, Carlos Alberto Caetano. **Técnicas para o desmame no ventilador mecânico**. Manole. São Paulo, 2002.
- 3 - BOMFIM, Vitoria Vilas Boas da Silva et al. Aspectos Radiológicos no Diagnóstico de Pneumonia. **Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação** , v. 9, n. 5, pág. 2523-2532, 2023.
- 4 - COSTANZO, Linda S. Costanzo **Fisiologia**. Rio de Janeiro: Grupo GEN, 2024. 504 p.
- 5 - FELIPE, D J P et al. Hallazgos iniciales en la radiografía de tórax como predictores de empeoramiento en la infección pulmonar por SARS-CoV-2. Correlación en 265 pacientes. *Radiología* vol. 63,4 (2021): 324-333. doi:10.1016/j.rx.2021.03.004. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8040537/>.
- 6 - HALL, John E.; HALL, Michael E. **Guyton & Hall - Tratado de Fisiologia Médica**. 14. ed. Rio de Janeiro: Grupo GEN, 2021. 1082 p.
- 7 - KLEIN, Jeffrey S.; BRANT, William E.; Clyde A. Helms; et al. **Brant e Helms Fundamentos de Radiologia: Diagnóstico por Imagem**. Rio de Janeiro: Grupo GEN, 2022. 4. ed. 1320 p.
- 8 - MOORE, Keith L.; DALLEY, Arthur F.; AGUR, Anne M R. **Anatomia Orientada para Clínica**. 9. ed. Rio de Janeiro: Grupo GEN, 2024. 1064 p.
- 9 - NET, Àlvar; BENITO, Salvador. **Ventilação mecânica**. Revinter. Rio de Janeiro, 2002.
- 10 - SANTA CRUZ R, VILLAREJO F, IRRAZABAL C, CIAPPONI A. High versus low positive end-expiratory pressure (PEEP) levels for mechanically ventilated adult patients with acute lung injury and acute respiratory distress syndrome. **Cochrane Database of Systematic Reviews 2021**, Issue 3. Art. No.: CD009098. DOI: 10.1002/14651858.CD009098.pub3. Acesso em: 11 jul 2024.
- 11 - SILVA, Luiz Carlos Corrêa; RUBIN, Adalberto Sperb; SILVA, Luciano Müller Corrêa. **Avaliação funcional pulmonar**. Rio de Janeiro: Revinter, 2000.
- 12 - WEST, John B. **Fisiologia Respiratória: Princípios básicos**. 11. ed. Porto Alegre: Artmed, 2024. 264 p.