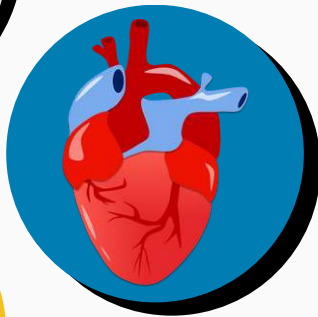
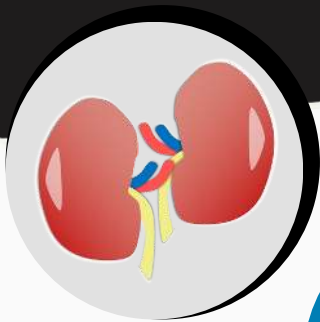
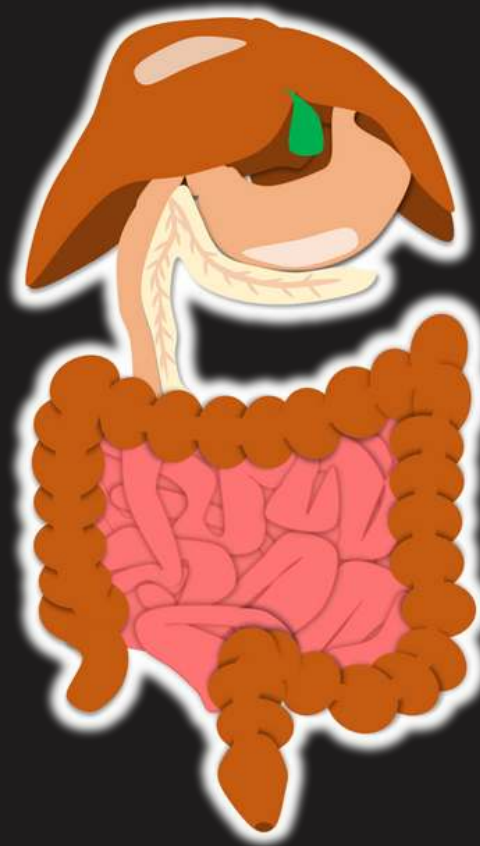
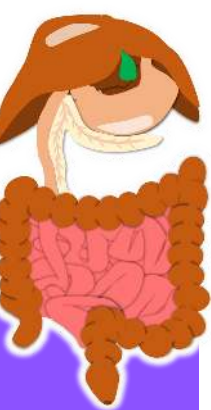




FISIOLOGIA DO SISTEMA DIGESTÓRIO



M.V Jonathan Lima



FISIOLOGIA DO SISTEMA DIGESTÓRIO



Controle da função gastrointestinal

Sistema nervoso autônomo	2
Sistema endócrino	2
Sistema nervoso entérico	3
Sistema endócrino entérico	6
Sistema imunológico	7

Motilidade gastrointestinal

Atividade elétrica	8
Contração sincronizada	9
Motilidade do esôfago	10
Motilidade gástrica	10
Motilidade do intestino delgado	12
Motilidade do intestino grosso	14

Secreções gastrointestinais

Secreção salivar	16
Secreção gástrica	16
Secreção pancreática	20
Secreção biliar	21

Digestão e absorção

Anatomia do intestino delgado	23
Microambiente de digestão e absorção	25
Digestão de carboidratos	27
Digestão de proteínas	27
Digestão de gorduras	28

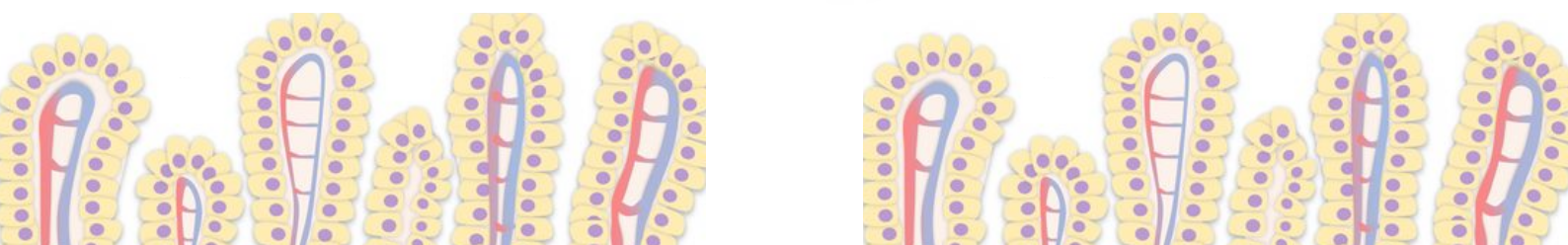


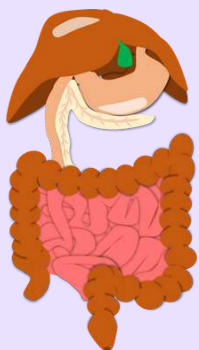
Aproveitamento de nutrientes

Combustíveis metabólicos	31
Fase de absorção	32
Fase pós absorção	34
Períodos de insuficiência energética	35

Digestão fermentativa

Compartimentos fermentativos	36
Ecossistema nos compartimentos	36
Substratos da fermentação	37
A fermentação	38
Fermentação nos ruminantes	38
Fermentação em equinos e outras espécies	41

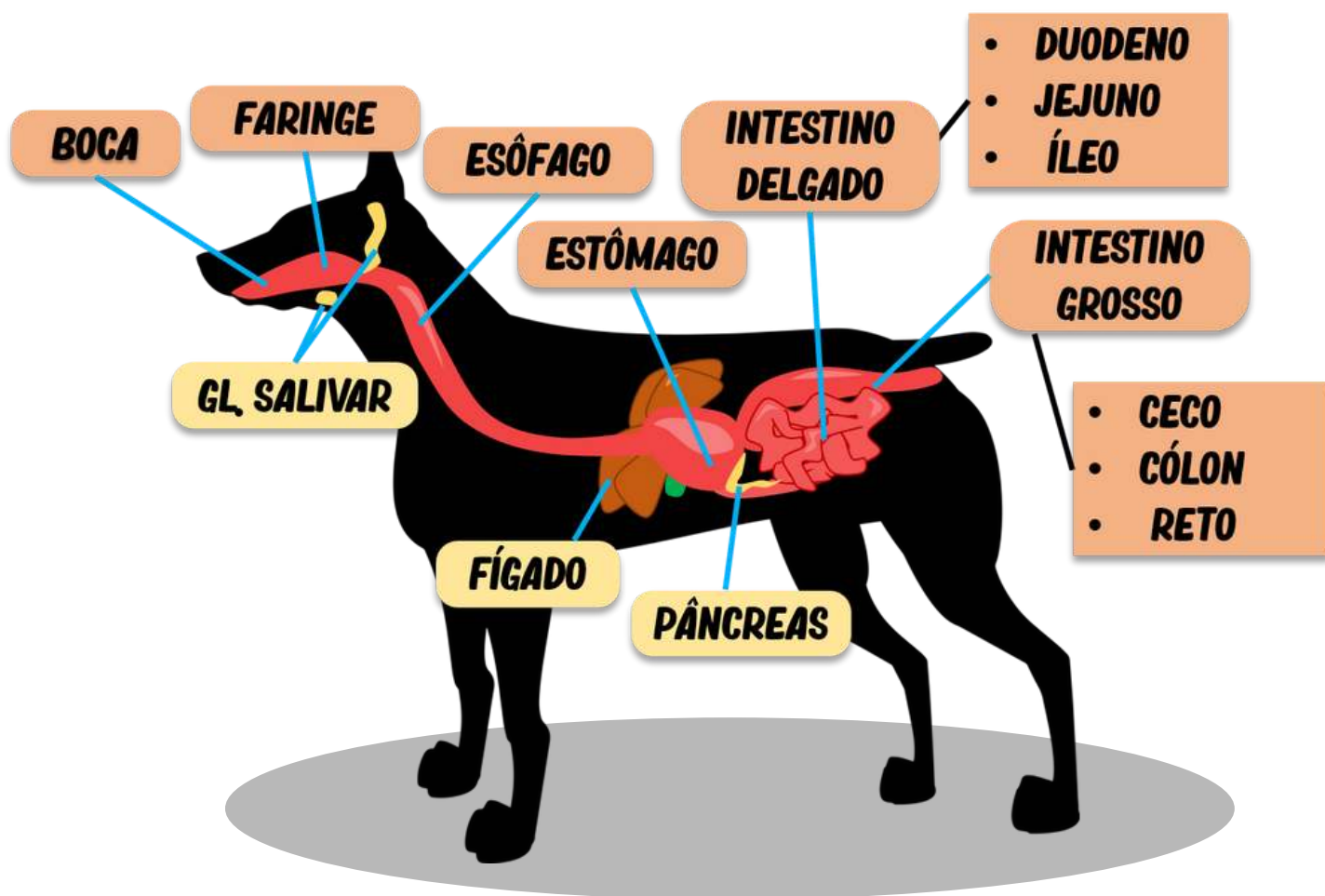




INTRODUÇÃO À FISIOLOGIA DO SISTEMA DIGESTÓRIO

O sistema digestório é formado por um conjunto de órgãos que realizam a digestão. Este sistema é complexo e há muitas variações anatômicas pelo **trato gastrointestinal** (TGI) e as **glândulas acessórias** entre as espécies. Porém, a função é basicamente a mesma: transformar as macromoléculas em micromoléculas absorvíveis.

O TGI compreende a boca, faringe, esôfago, estômago, intestino delgado (duodeno, jejuno e íleo) e intestino grosso (ceco, cólon e reto).



CONTROLE DA FUNÇÃO

GASTROINTESTINAL

Para que os nutrientes sejam reduzidos e aproveitados pelo organismo, o trato gastrointestinal (TGI) desempenha cinco funções: **motilidade, secreção, digestão, absorção e armazenamento**.

Para realizar tais funções, existem dois níveis de controle para regular as atividades, o nível **extrínseco** e o nível **intrínseco**.

Controle extrínseco: realizado pelo sistema nervoso e sistema endócrino.

Controle intrínseco: realizado pelo sistema nervoso entérico e pelo sistema endócrino entérico.

Controle extrínseco

O controle da função GI exercido pelo sistema nervoso e pelo sistema endócrino é muito semelhante ao controle de outros órgãos e sistemas.

Sistema nervoso



O sistema nervoso envia fibras simpáticas e parassimpáticas ao TGI. A inervação é fornecida por dois nervos:

Nervo vago: envia fibras parassimpáticas. O parassimpático, de forma geral, tem ação **excitatória** (aumento das secreções e motilidade).

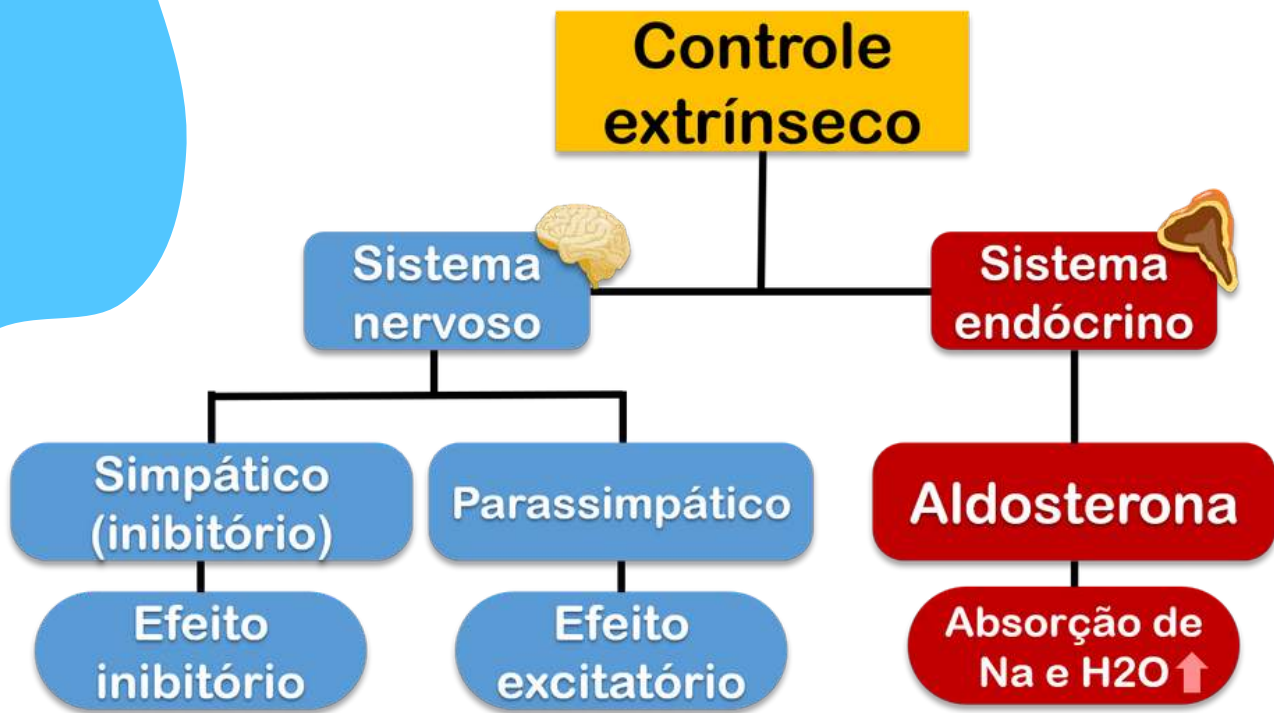
Nervo esplâncnico: envia fibras simpáticas. O efeito simpático **inibe as secreções e motilidade gastrointestinal**.

Sistema endócrino



O hormônio que possui ação direta na função GI é a **aldosterona**. É secretada pelo sistema renina-angiotensina-aldosterona e sua função é aumentar a absorção de sódio e água no intestino grosso e glândulas salivares.





Controle intrínseco

O controle intrínseco está localizado dentro do próprio TGI. Constituído pelo sistema nervoso entérico (SNE) e sistema endócrino entérico (SEE).

Ambos controlam as atividades por meio de substâncias químicas.

Parácrinas: substâncias secretadas no meio intersticial e atingem células próximas por difusão.

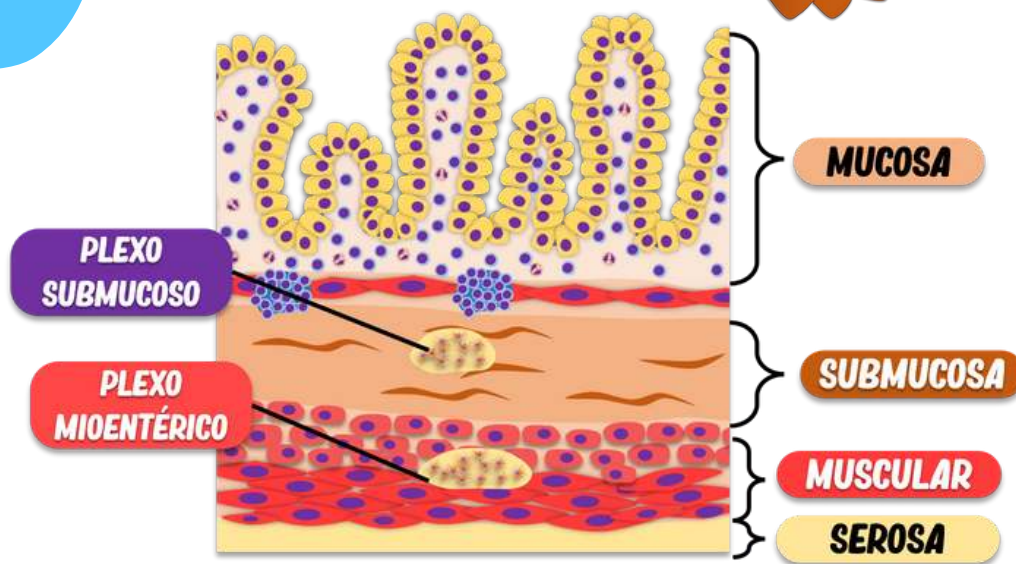
Autócrina: São aquelas que atingem a própria célula que a secretou.

Endócrinos: são aquelas substâncias que caem no sangue para ter ação em um órgão/tecido distante.

Neurócrinas: são moléculas secretadas pelos neurônios entéricos.

Sistema nervoso entérico

Histologicamente, o TGI é constituído por quatro camadas: mucosa, submucosa, muscular (circular interna e longitudinal externa) e serosa.



O sistema nervoso entérico é formado por dois plexos:

Plexo submucoso: localizado na camada submucosa. Controla as secreções e o fluxo sanguíneo local.

Plexo mioentérico: localizado entre a camada muscular interna e longitudinal externa. Controla a motilidade GI.



O sistema nervoso autônomo se conecta justamente com estes plexos para controlar o trato digestório, ou seja, o controle é indireto, já que ele estimula o SNE.

Neste sistema, podemos encontrar diferentes tipos de neurônios.



Existem os **neurônios aferentes (sensoriais)**, **interneurônios** e **neurônios motores (eferentes)**.

Também existem receptores:

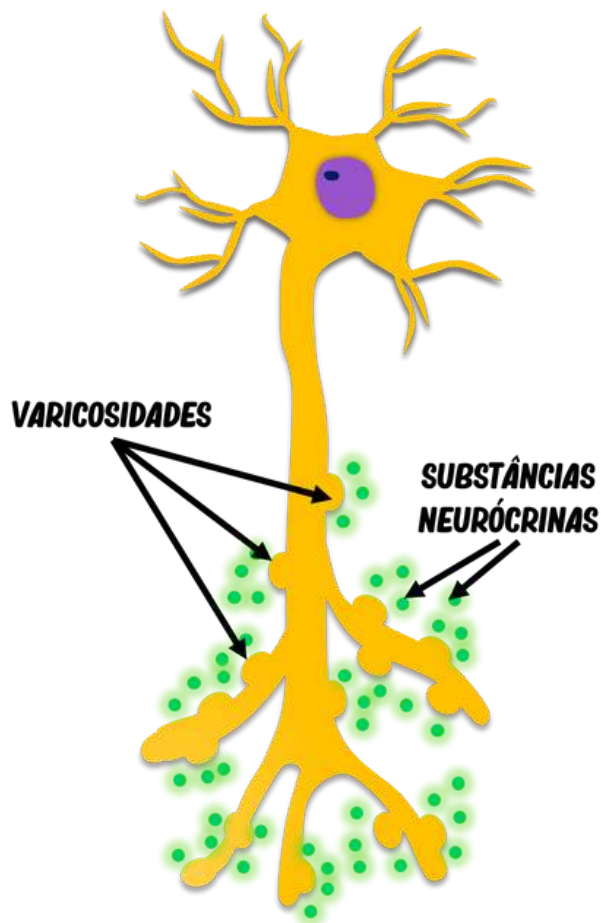
mecanorreceptores: detectam alterações mecânicas. Estão localizados na camada muscular.

quimiorreceptores: detectam alterações químicas. Localizados na mucosa.

Os receptores captam as alterações e enviam para os neurônios sensoriais. Os neurônios motores ficam responsáveis por inervar glândulas e músculos, tendo ação inibitória ou excitatória.

Neurônios do SNE

Uma particularidade importante dos neurônios entéricos é que estes possuem diversas tumefações (aumento de volume) ao longo de suas ramificações. Tais tumefações levam o nome de **varicosidades**.



Esta configuração permite que as substâncias sejam liberadas em uma área mais ampla.

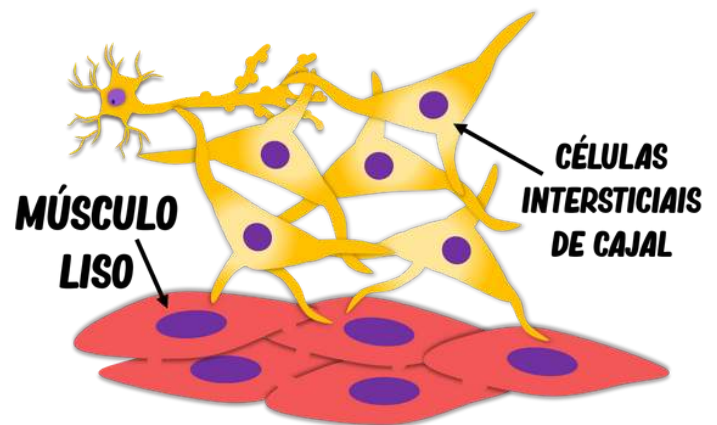
Existem vários tipos de substâncias e elas podem ter natureza inibitória ou excitatória.

Substâncias neurócrinas

- **Acetilcolina** (excitatória)
- **Adrenalina** (inibitória)
- **Substância P** (excitatória)
- **Peptídeo vasoativo** (inibitória)
- **Óxido nítrico** (inibitória)

Células de Cajal

Além de neurônios, o SNE ainda conta com células especiais conhecidas como **células intersticiais de Cajal**. Elas ficam em contato com as células musculares e os neurônios, sendo importante para a contração muscular. Funcionam como **células marca-passo**.

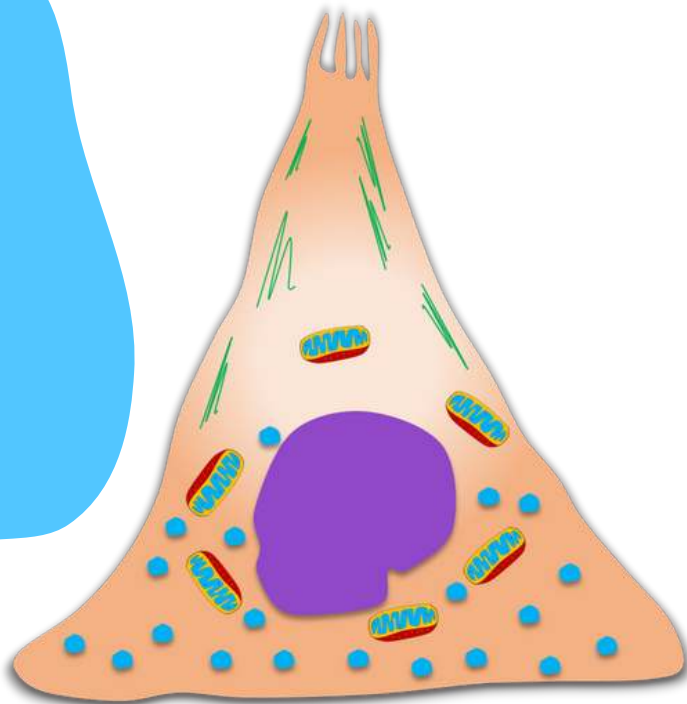


Sistema endócrino

O sistema endócrino entérico consiste em células dispersas entre as células epiteliais da mucosa.

As células endócrinas possuem um ápice estreito e uma base larga repleta de grânulos secretórios.

ÁPICE ESTREITO



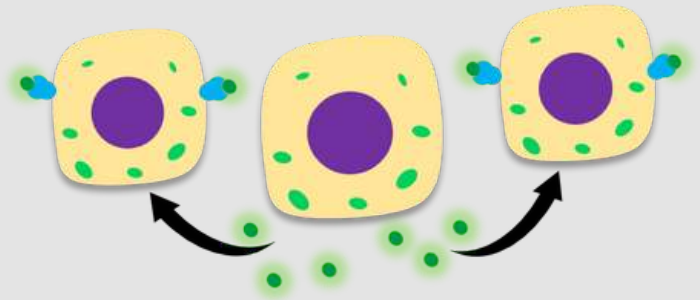
BASE LARGA

O ápice fica voltado para o lúmen para detectar as alterações. As substâncias são secretadas pela base.

Relembrando...

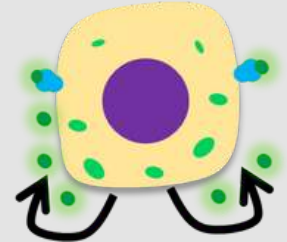
Parácrina

Substâncias atingem células vizinhas por difusão.



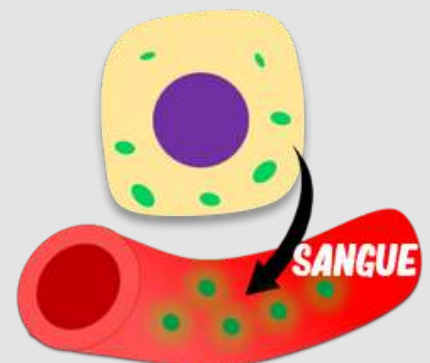
Autócrina

Substâncias são secretadas e atingem a própria célula que a secretou.



Endócrina

Substâncias são secretadas e caem no sangue para atingir alvos distantes.



Hormônios do TGI



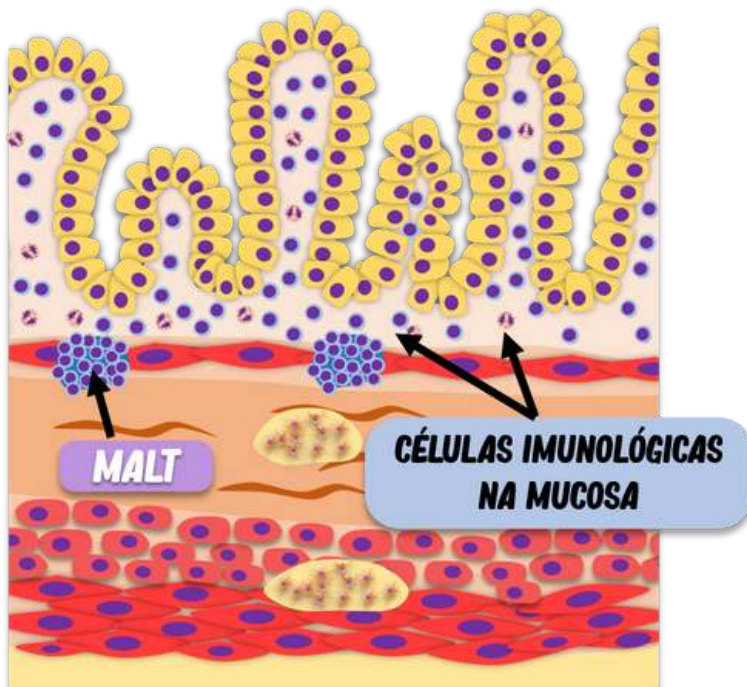
Gastrina: aumenta a secreção de ácido clorídrico.

Secretina: estimula a secreção de suco pancreático, bile e retarda o esvaziamento gástrico.

Colecistocinina: estimula a secreção de suco pancreático e contração da vesícula biliar.

Sistema imunológico

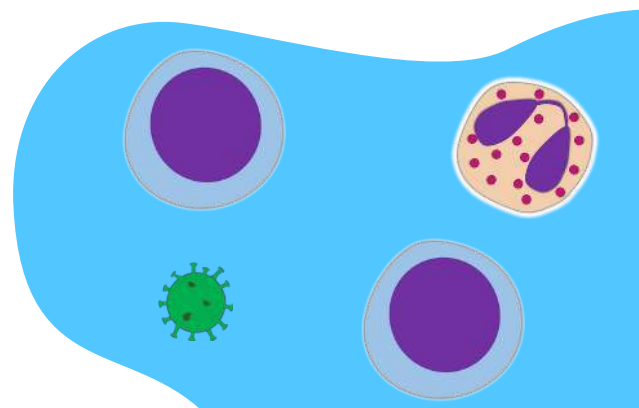
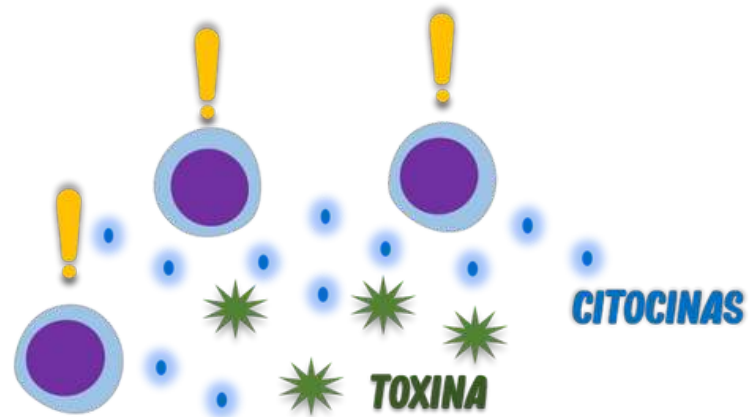
O sistema imunológico também pode controlar as funções do TGI. Diariamente inúmeros agentes agressores chegam até o TGI, e por este motivo é necessário um sistema eficiente de defesa.

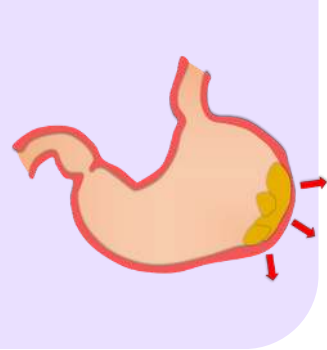


As células do sistema imunológico ficam dispersas pela mucosa e, por vezes, formando agregados.

Quando estas são desafiadas com algum estímulo agressor, podem responder de inúmeras formas (criando células de memória, secretando anticorpos e **citocinas**).

As citocinas podem influenciar o SNE e o SEE para aumentar as secreções e motilidade e expulsar os agentes agressores.





MOTILIDADE DO TRATO GASTROINTESTINAL

Os objetivos do movimento (motilidade) do TGI são:

- **Propulsão:** empurrar o alimento
- **Retenção** para que ele fique armazenado em certo local
- **Quebra física**, ou seja fragmentar o alimento
- **Misturar com as secreções**
- **Circular a ingesta** para entrar em contato com a superfície absorviva

Conceitos importantes



Tempo de trânsito: tempo que demora para a ingesta se deslocar de um ponto ao outro.

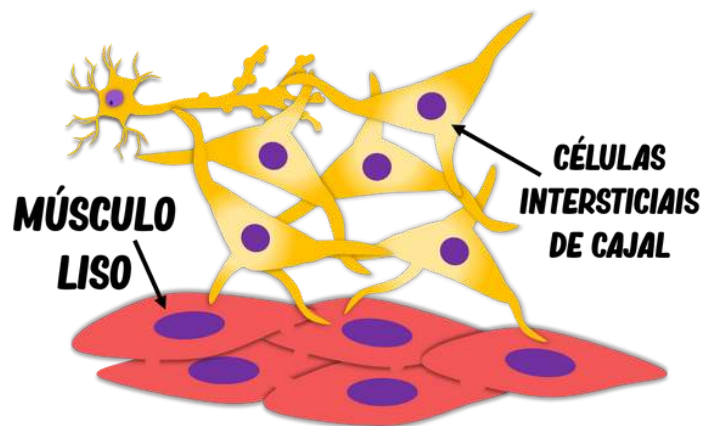
sentido oral: movimento em direção à boca

Sentido aboral: Movimento em sentido ao ânus

Peristaltismo: anel de constrição que empurra a ingesta ao longo de uma estrutura tubular.

Atividade elétrica

Para o músculo liso GI contrair, se faz necessário atividade elétrica. Isto é gerado pelas **células intersticiais de Cajal**.

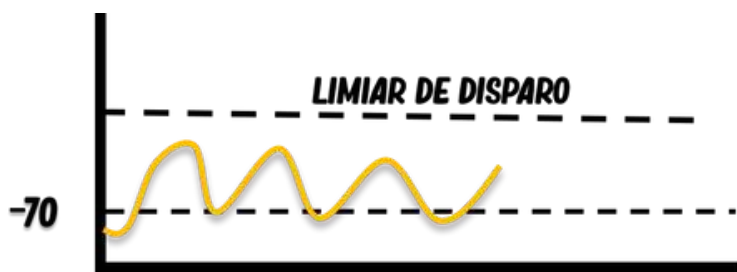


Elas ficam em contato com o músculo liso e neurônios entéricos, e geram ondas elétricas conhecidas como **ondas lentas**.

O músculo liso e as células de Cajal são interconectados por estruturas chamadas de **nexos**. Isto permite que as ondas lentas passem de uma célula para outra. Em outras palavras, **a atividade elétrica de uma célula ocorre em outras também.**

Ondas lentas

A contração ocorre quando há despolarização. Para que a despolarização ocorra, a face interna da célula precisa ficar positiva e atingir o limiar de disparo. As ondas lentas são **despolarizações parciais da membrana**.



O potencial de membrana passa por oscilações, de forma que o **limiar de disparo não é atingido**.

As ondas passam constantemente pelas células, porém não estimulam a contração, mas prepara a musculatura para contrair. A

contração só ocorre quando o músculo é sensibilizado previamente com uma substância excitatória.

As **sustâncias excitatórias elevam a linha de base** da onda lenta, fazendo com que o limiar seja atingido.

Diante de uma **substância inibitória, a linha de base é diminuída**, o que dificulta a despolarização e consequente contração muscular.

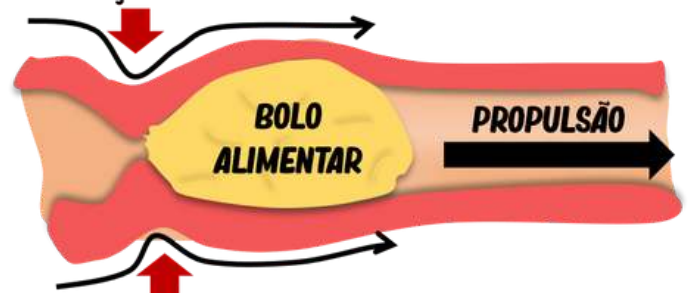
Contração sincronizada

A conexão entre as células permite que a **contração das células ocorra simultaneamente**, como se fosse uma só. Isto permite que a ingesta seja esmagada ou propelida.

CONTRAÇÃO APENAS UMA PARTE



CONTRAÇÃO SIMULTÂNEA

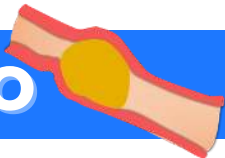


Padrões de motilidade

Primeiramente, o alimento precisa ser apreendido e deglutido. A deglutição envolve os seguintes eventos:

- 1- interrupção momentânea da respiração.
- 2- Língua é pressionada contra o palato duro.
- 3- Elevação do palato mole.
- 4- Fechamento da glote
- 5- Contração do músculo da faringe para empurrar o bolo alimentar para o esôfago
- 6- Abertura do esfíncter esofágico superior.

Esôfago



O esôfago é um órgão tubular que tem a função de conduzir o bolo alimentar até o estômago através de movimentos de propulsão.

Sua musculatura é composta por músculo estriado esquelético, o que é diferente de outras porções do TGI.

Estômago



Fisiologicamente, o estômago é dividido em região proximal e distal. Cada uma com diferentes padrões.

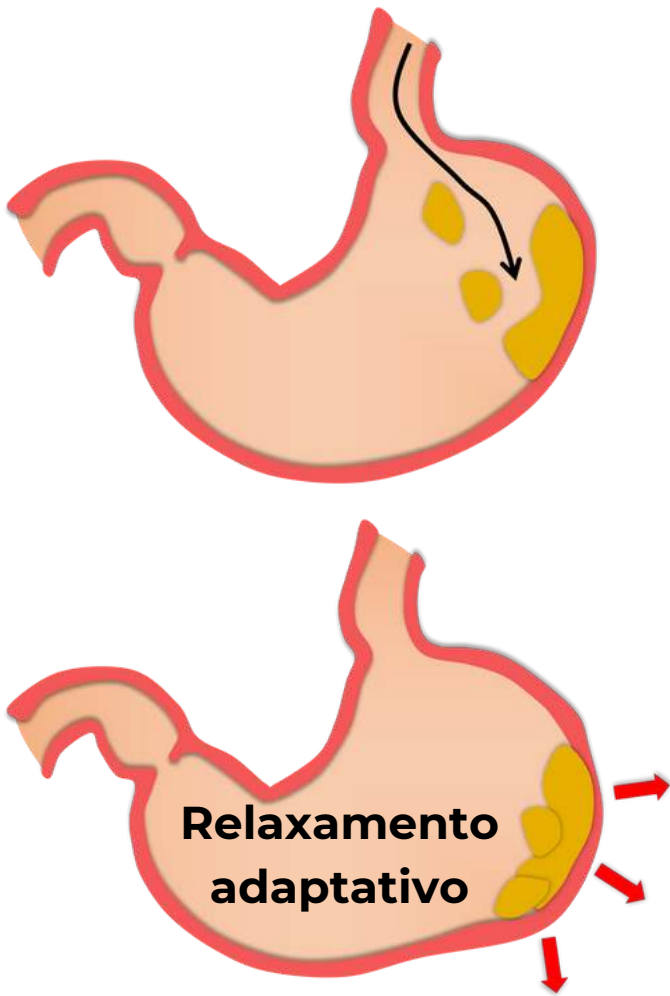
O padrão de motilidade do estômago pode ser dividido em duas fases: digestiva e interdigestiva.

Fase digestiva: ocorre quando o alimento está sendo processado no estômago.

Fase interdigestiva: período entre as refeições.

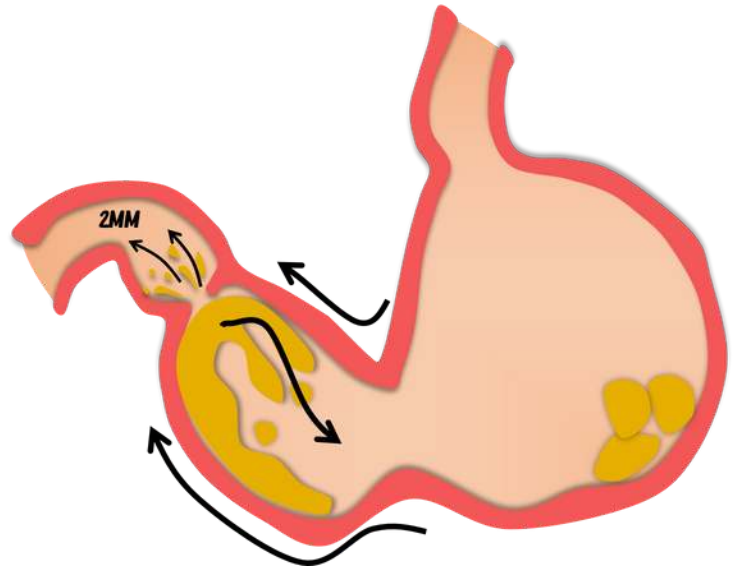
Fase digestiva

Estômago proximal: Ao chegar no estômago, o bolo alimentar cai na região proximal. O primeiro reflexo que ocorre é o **relaxamento adaptativo**. Isso permite que a parede se molde para acomodar o conteúdo alimentar. Nesta região, as **contrações são fracas e contínuas**, e o alimento é direcionado aos poucos para a região distal.



Estômago distal: Na parte distal, as **contrações são fortes** e servem para **triturar e misturar o alimento** com as secreções digestivas do estômago. O peristaltismo forte do antro **empurra o material contra o piloro contraído**. A abertura do piloro só permite a passagem de moléculas menores do que dois milímetros. **As partículas maiores voltam ao antro.**

No estômago distal, o alimento é transformado em líquido e enviado ao duodeno em uma velocidade controlada.



Esvaziamento gástrico

o estômago envia a ingesta ao duodeno, mas a velocidade precisa ser compatível com a capacidade de digestão e absorção do duodeno. Para fazer este controle, o duodeno libera colecistocinina e secretina para retardar o esvaziamento gástrico. Isto é chamado de **reflexo entero-gástrico**.

Fase interdigestiva

Esta fase ocorre entre as refeições e serve para fazer uma "faxina" no estômago. Os materiais não digeridos na fase digestiva não passam para o duodeno e permanecem ali. nesta fase, ocorre o **complexo motor interdigestivo**. Consiste em uma **onda peristáltica** que se inicia no meio do estômago e corre em direção ao piloro relaxado, **empurrando tudo aquilo que não foi digerido para o duodeno**.

Reflexo do vômito

Este reflexo é controlado pelo sistema nervoso central, no tronco encefálico. Receptores espalhados no TGI captam os estímulos e enviam ao tronco encefálico, no centro do vômito. Para que o vômito ocorra, alguns, há uma sequência de eventos.

Eventos para o reflexo do vômito:

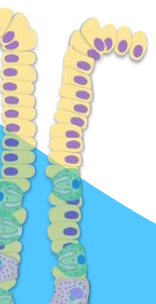
- 1- Fechamento do piloro, relaxamento da cárdia e músculo do estômago.
- 2- Contração da musculatura abdominal para aumentar a pressão da cavidade.
- 3- Diminuição da pressão intratorácica e fechamento da glote.
- 4- Movimentos antiperistálticos (sentido oral) do duodeno e relaxamento do esfíncter esofágico superior.

intestino delgado

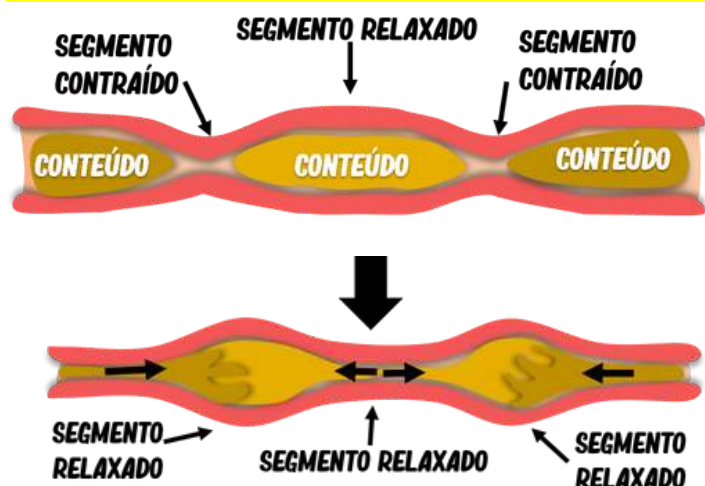
O intestino delgado, assim como o estômago, possui duas fases: a **digestiva** e a **interdigestiva**.

Fase digestiva

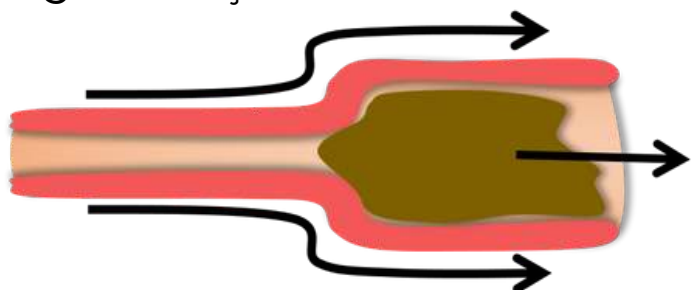
Composta por dois tipos de movimento: **propulsão** e **segmentação** (não propulsivo).



Segmentação: motilidade utilizada para misturar a ingesta com as secreções intestinais e colocar a ingesta em contato com a superfície absorviva. O intestino apresenta segmentos contraídos e outros relaxados. Em seguida, os relaxados contraem e os contraídos relaxam para jogar a ingesta para trás e para frente.



Propulsão: são os movimentos que empurram a ingesta para frente. No entanto, o material percorre uma curta distância e em seguida ocorre novamente segmentação.



Fase interdigestiva

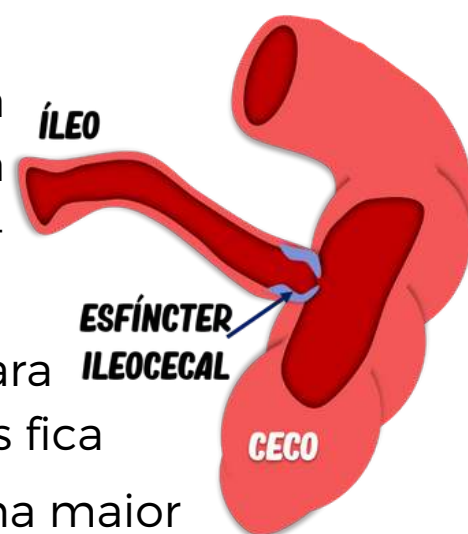
Nesta fase, ondas peristálticas fortes começam no duodeno e percorrem longas distâncias no intestino delgado. Este padrão é chamado de **complexo mioelétrico migrante** e sua função é tirar todo material não digerido do duodeno empurrando para o intestino grosso, além de controlar a população bacteriana.

junção ileocecal

Na junção entre o íleo e o ceco, encontra-se o esfíncter íleocecal.

A estrutura relaxa para o conteúdo passar do íleo para o ceco, mas fica

contraído na maior parte do tempo para impedir refluxo.

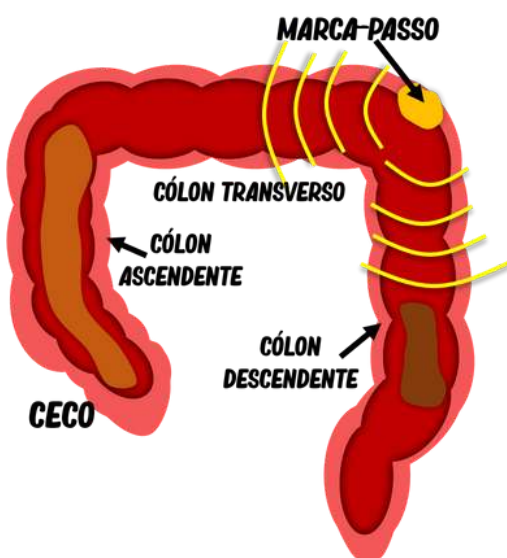


Intestino grosso

A maior parte do intestino grosso é constituída pelo cólon. As funções do cólon incluem:

- 1- Absorção de água e eletrólitos por meio da ação da aldosterona.
- 2- Armazenamento de fezes.
- 3- Processo de fermentação de matéria orgânica que escapou da digestão química.

O cólon é capaz de realizar movimentos de **segmentação**, **propulsão (peristaltismo)**, e **retropulsão (antiperistaltismo)**.

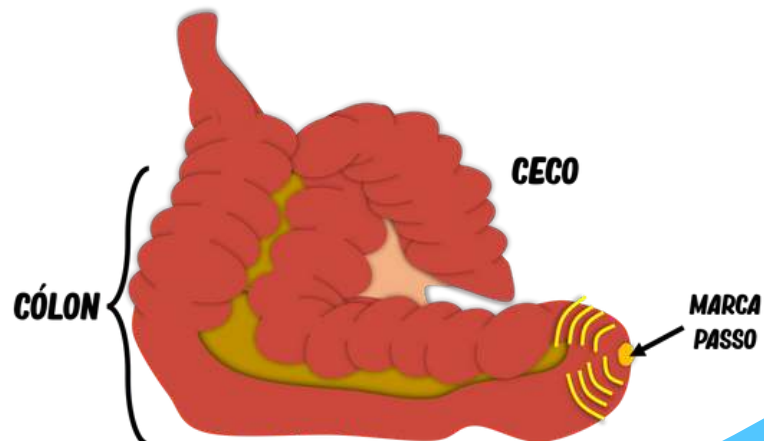


Em cães e gatos, existem células marca-passo entre o cólon transverso e o cólon descendente.

As ondas lentas disparadas levam aos movimentos de retropulsão no cólon transverso e consequentemente o acúmulo de conteúdo no cólon ascendente e ceco. No cólon descendente, ocorre **absorção de água e eletrólitos por ação da aldosterona**. Este mecanismo permite que o conteúdo fique com consistência semissólida.

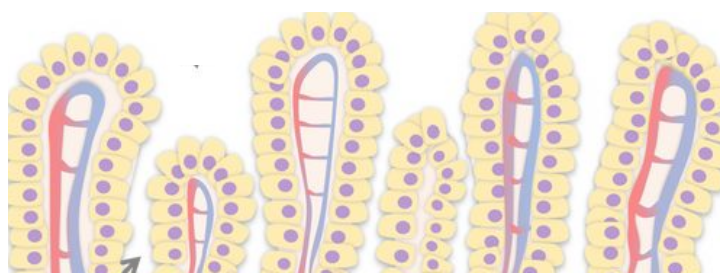
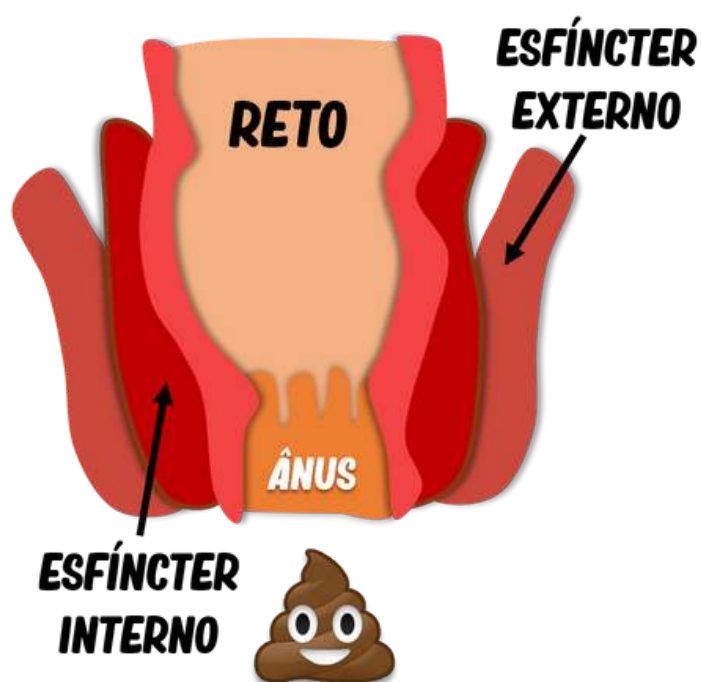
Herbívoros

os herbívoros possuem cólon desenvolvido para fazer fermentação, mas a motilidade é muito parecida. Os equinos possuem células marca-passo na flexura pélvica e realizam movimentos de segmentação, propulsão e retropulsão.

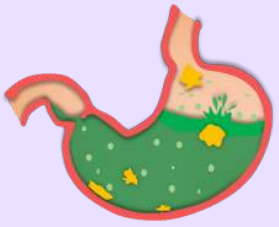


Controle da defecação

No reto, existem dois esfíncter: o **interno** e o **externo**. O interno é composto de músculo liso e fica responsável pela continência fecal. No ato da defecação, este esfíncter relaxa e o reto realiza movimentos peristálticos. O externo é composto por músculo estriado esquelético, de forma que o ato de defecar pode ser controlado voluntariamente.



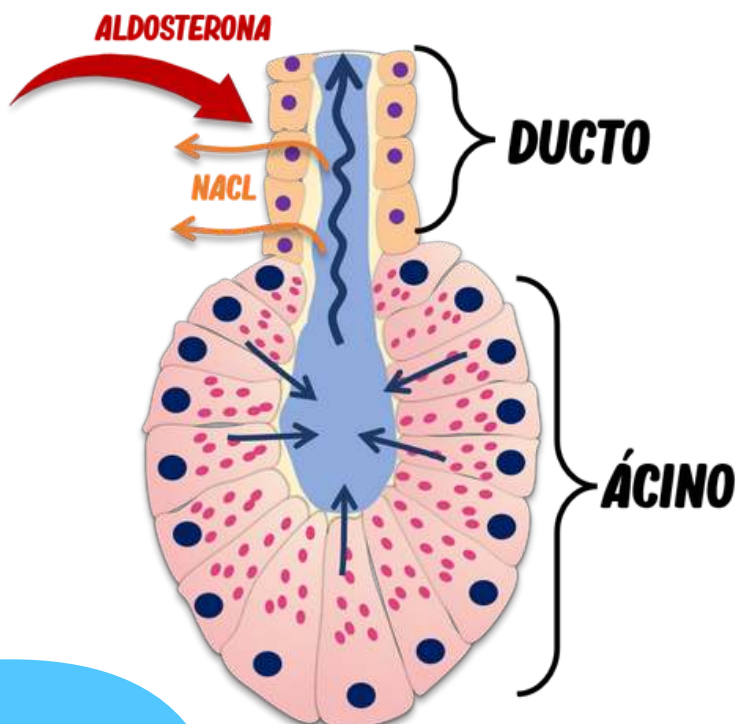
SECREÇÕES DO TRATO GASTROINTESTINAL



Os processos de digestão e absorção ocorrem em meio aquoso por conta das diferentes secreções. As secreções das glândulas do sistema digestório possibilitam que a digestão ocorra.

Secreção salivar

As glândulas salivares são compostas por ácinos conectados ao sistema ramificado de ductos. É muito parecido com o pâncreas.



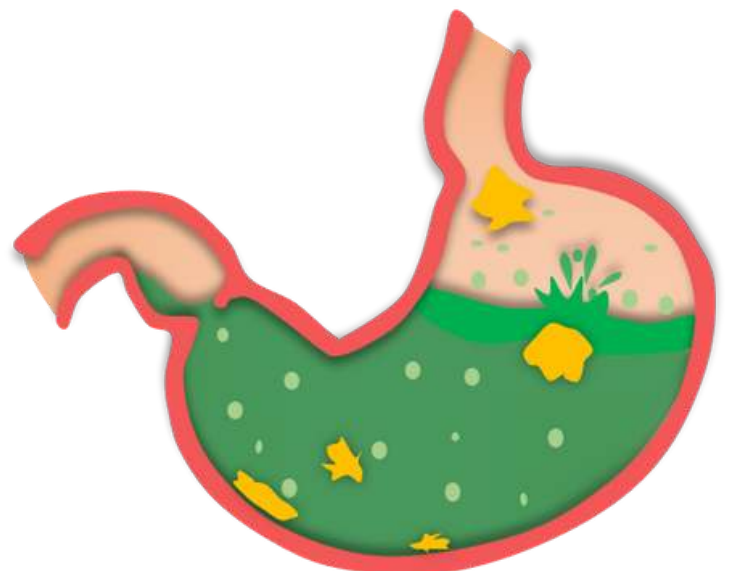
As células acinares produzem a saliva e direciona aos ductos. Nos ductos, a composição da saliva é alterada (reabsorção de eletrólitos por ação da aldosterona).

Funções da saliva:

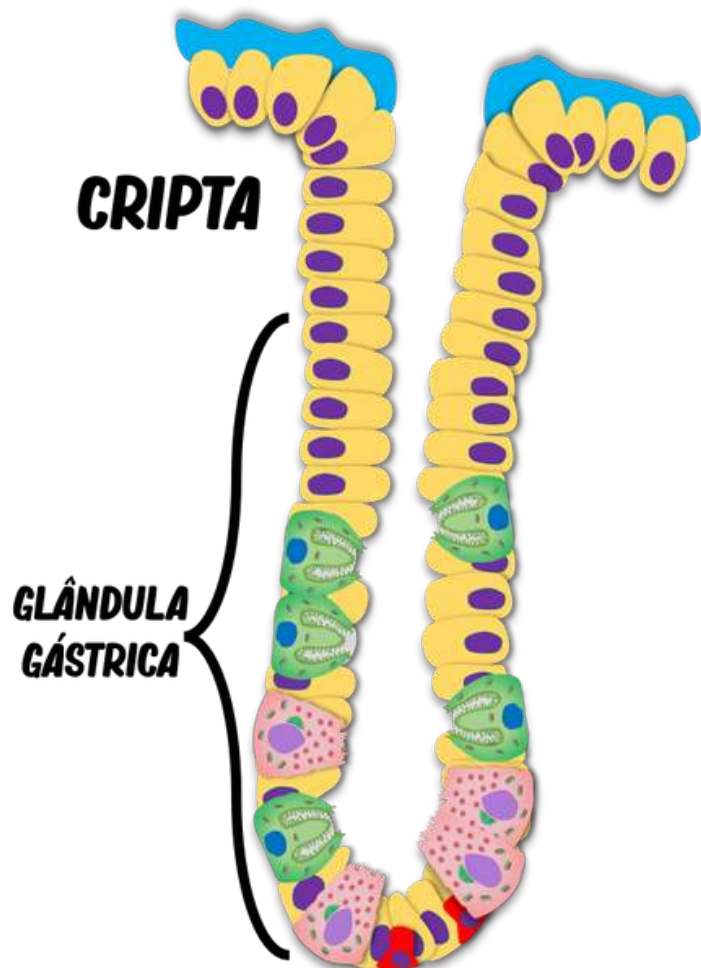
- Umedecer o bolo alimentar
- Iniciar a digestão de amido (onívoros)
- Ação antimicrobiana (lisozima e anticorpos)
- Neutralizar ácidos (ruminantes)

Secreção gástrica

O bolo alimentar chega ao estômago e entra em contato com as secreções gástricas.



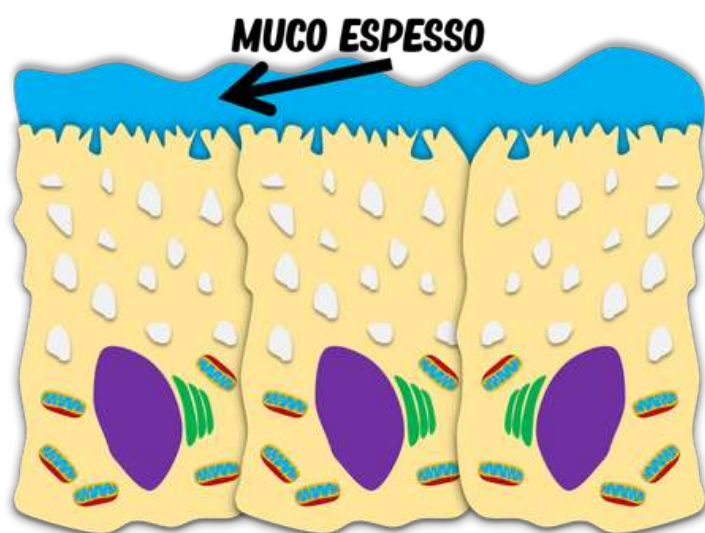
A porção glandular do estômago é repleta de criptas contínuas com as **glândulas gástricas**.



Nas glândulas, observamos uma variedade de células, mas apenas três serão destacadas: **células de superfície da mucosa, células principais e células parietais**.

Células de superfície da mucosa

Recobrem a superfície da mucosa gástrica e as criptas. A função destas células é produzir um **muco espesso** que recobre a mucosa e **protege do dano químico (HCL) e mecânico**.



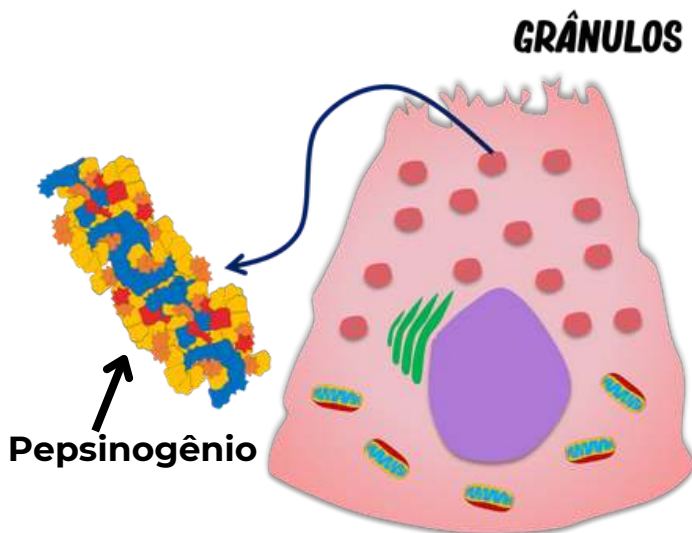
Importante saber!



O muco protege a superfície contra o ácido clorídrico e dano mecânico. Quando se administra anti-inflamatórios ao animal devemos tomar cuidado, pois eles reduzem a produção deste muco e a mucosa fica desprotegida. Estes animais podem desenvolver úlceras no TGI.

Células principais

As células principais são responsáveis pela síntese e secreção do **pepsinogênio** (forma inativa da pepsina). Após a secreção, a molécula entra em contato com o pH baixo e é ativada, se tornando pepsina.



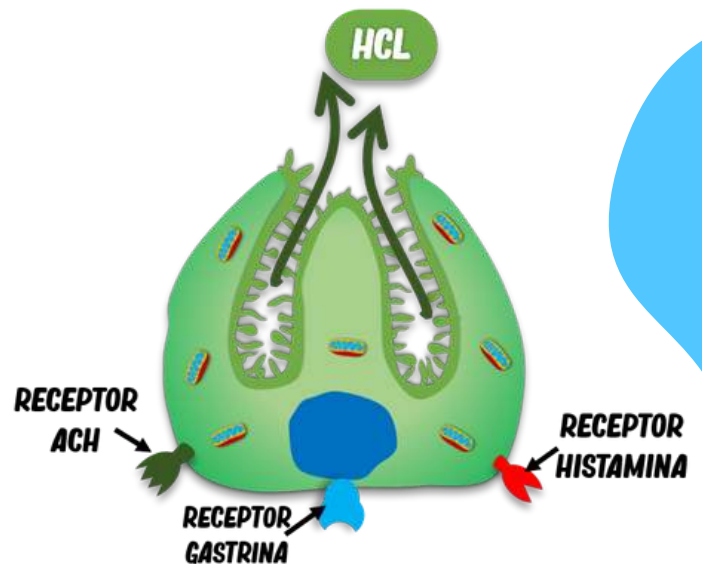
A enzima fica estocada em grânulos dentro da célula principal.

De maneira geral, as enzimas produzidas no forma inativa são chamadas de zimogênio.

Células parietais

As células parietais são responsáveis pela secreção do ácido clorídrico (HCL). No entanto, a produção de HCL ocorre fora da célula.

O hidrogênio é jogado para o lúmen por meio da bomba de prótons e o cloreto também é transportado para o lúmen por meio de um transportador. Veja maiores detalhes na videoaula de secreções do TGI.

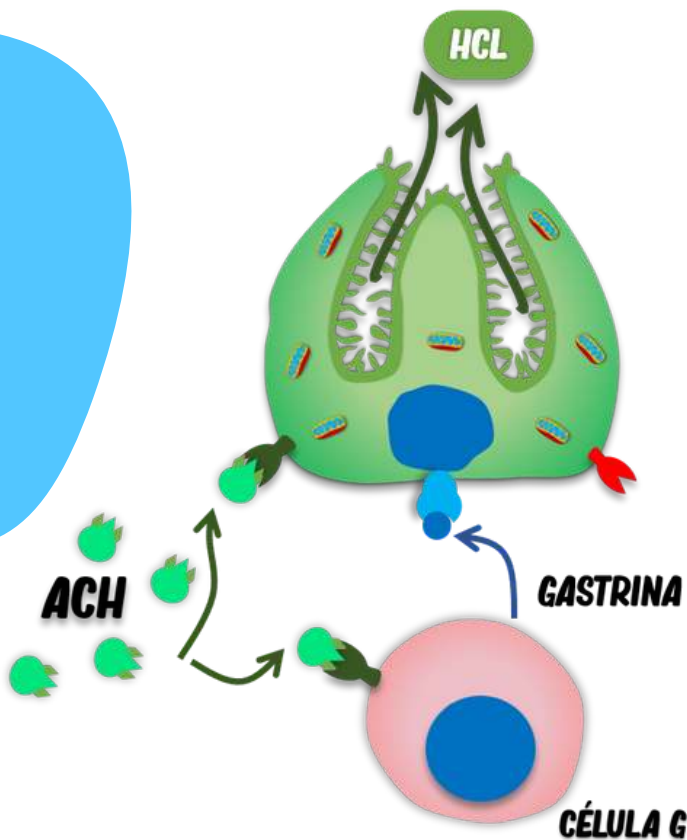


A célula parietal possui receptores para acetilcolina, histamina e gastrina. O estímulo para a secreção ocorre na **fase cefálica e gástrica das secreções.**

Fase cefálica das secreções

A fase cefálica das secreções ocorre **antes do bolo alimentar chegar ao estômago**.

Quando o animal está na expectativa de receber o alimento, o sistema nervoso parassimpático estimula o sistema nervoso entérico (SNE) a liberar acetilcolina (ACH). A ACH atinge as células parietais estimulando a secreção de HCL e as células G, secretoras de gastrina.



A gastrina cai no sangue e também atinge as células parietais estimulando ainda mais a secreção de HCL.

Fase gástrica das secreções

Quando o estômago recebe o alimento, começa a fase gástrica. O bolo alimentar causa distensão da parede gástrica e os mecanorreceptores sinalizam para o SNE liberar acetilcolina, que atinge as células parietais e células G. É parecido com a fase cefálica.

O alimento também funciona como um tampão que aumenta o pH do estômago. O aumento do pH estimula a secreção de mais gastrina.

Outra célula importante são as células enterocromafins que secretam histamina e respondem à acetilcolina e gastrina. **A ativação dos três receptores estimula ao máximo a secreção de HCL.**

Controle das secreções gástricas

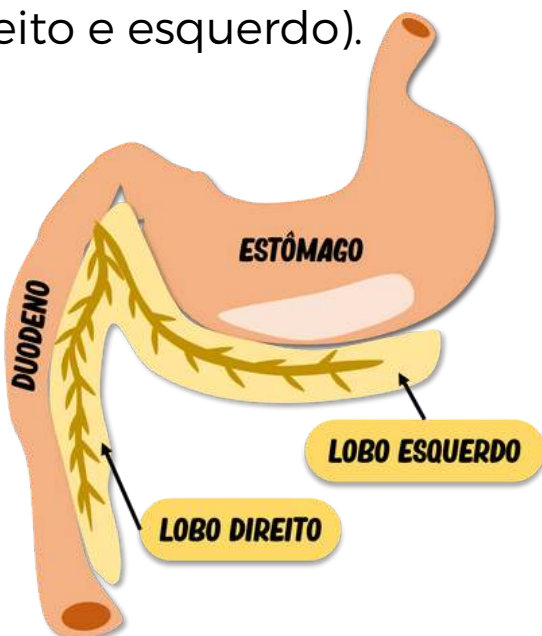
Quando o HCL aumenta, o pH diminui. Se o pH chegar a dois, ocorre diminuição da secreção de gastrina, e quando chega a um ela para completamente.

Sem o estímulo da gastrina a secreção de HCL é reduzida e o pH volta a aumentar.

Quando o quimo chega ao duodeno, a secretina é liberada e causa diminuição da secreção de HCL.

Secreção pancreática

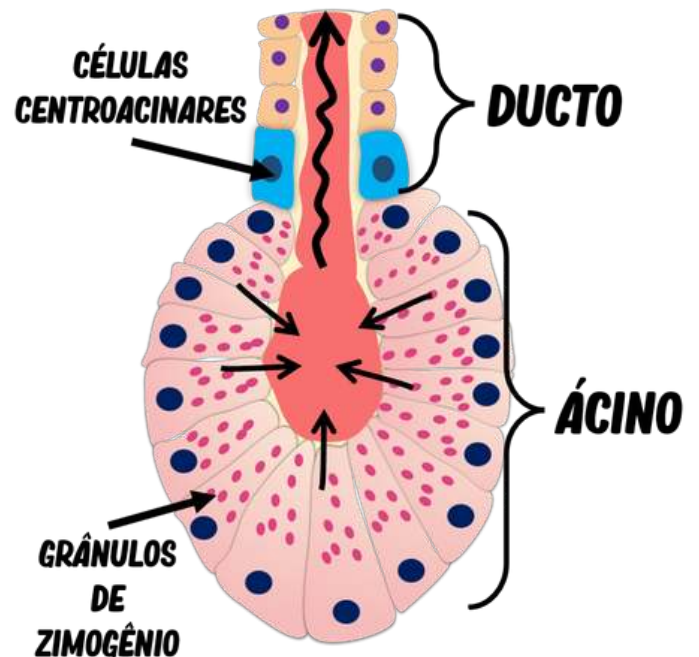
Anatomicamente, o pâncreas é constituído por dois lobos (direito e esquerdo).



O lobo esquerdo acompanha a curvatura maior do estômago, enquanto o direito acompanha o duodeno descendente.

O tecido glandular é formado pela parte endócrina (ilhas pancreáticas) responsável pela **secreção de insulina e glucagon**. A porção exócrina é responsável pela produção do **suco pancreático**.

Histologicamente, a porção exócrina é formada por **ácinos conectados a um sistema ramificado de ductos**.



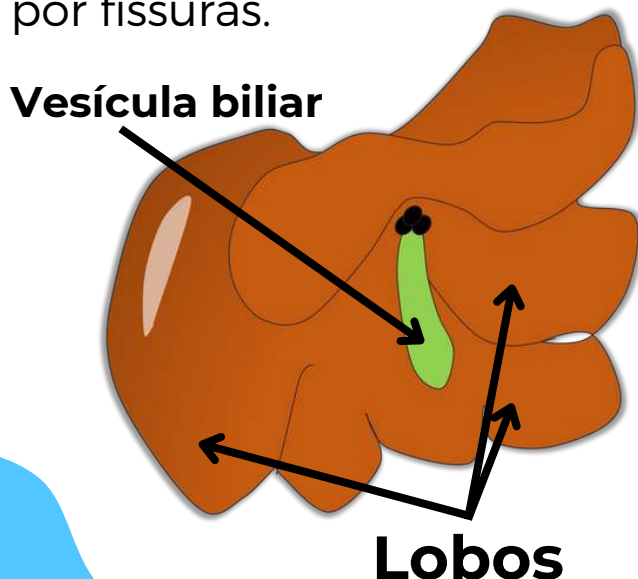
As células acinares produzem as enzimas digestivas inativas que são estocadas em **grânulos de zimogênio**.

Na junção entre o ducto e o ácino existem as **células centroacinares que secretam bicarbonato** para alcalinizar as secreções.

A **colecistocinina estimula a secreção das enzimas** pelas células acinares, enquanto a **secretina estimula a secreção de bicarbonato** pelas células centroacinares.

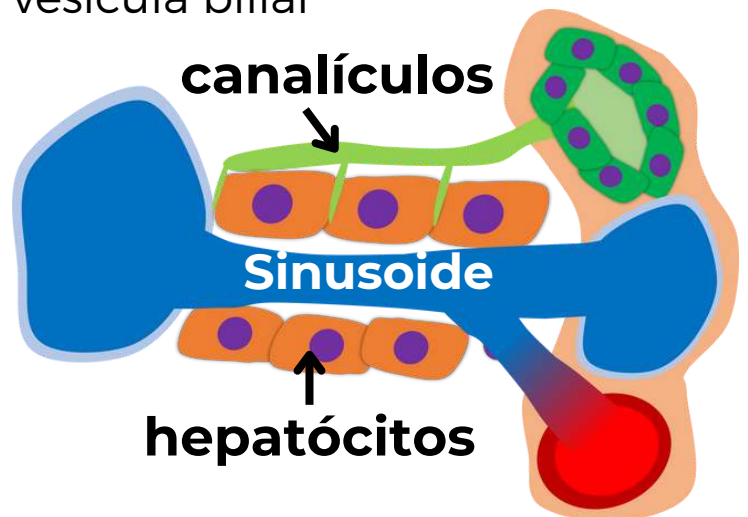
Secreção de bile

Macroscopicamente, o fígado é formado por lobos separados por fissuras.



Na microscopia, o parênquima é formado por **lóbulos**. Cada lóbulo é formado por hepatócitos organizados em placas e ficam entremeados aos capilares sinusóides. Entre os hepatócitos existem também os canalículos biliares.

A bile é sintetizada nos hepatócitos, cai nos canalículos, e depois é direcionada para a vesícula biliar.



Composição da bile:

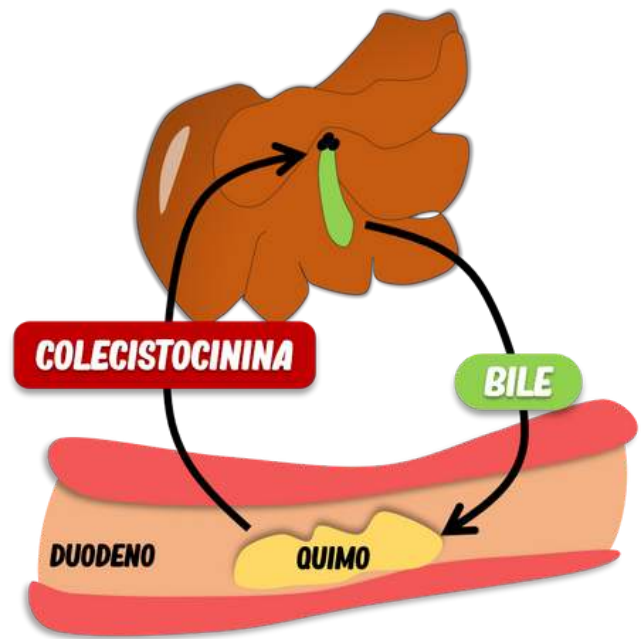
A bile é composta por água, eletrólitos, colesterol, bilirrubina e ácidos biliares.

Os ácidos biliares são um dos principais componentes. A molécula possui ação detergente para facilitar digestão de gorduras.



Na sua estrutura, existem porções com afinidade pelos lipídeos (hidrofóbica) e porções com afinidade pela água (hidrofílica). Esta característica permite que ocorra a emulsificação da gordura.

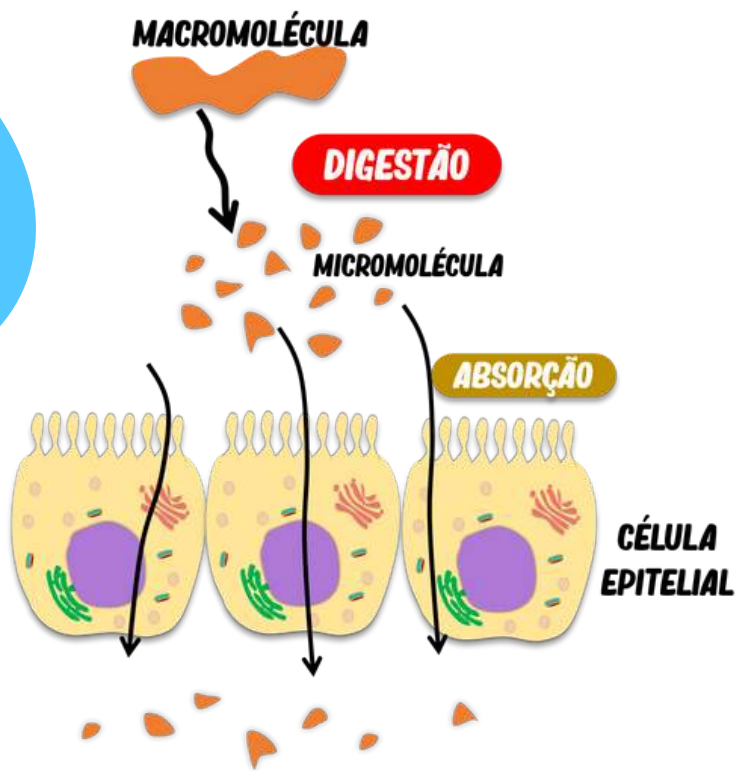
A bile fica armazenada na vesícula biliar. Quando o quimo chega ao duodeno, a colecistocinina é liberada (principalmente se houver gordura na composição). **A colecistocinina estimula a contração da vesícula biliar e relaxamento do esfíncter de Oddi.** Com isto, o conteúdo biliar é despejado no duodeno.



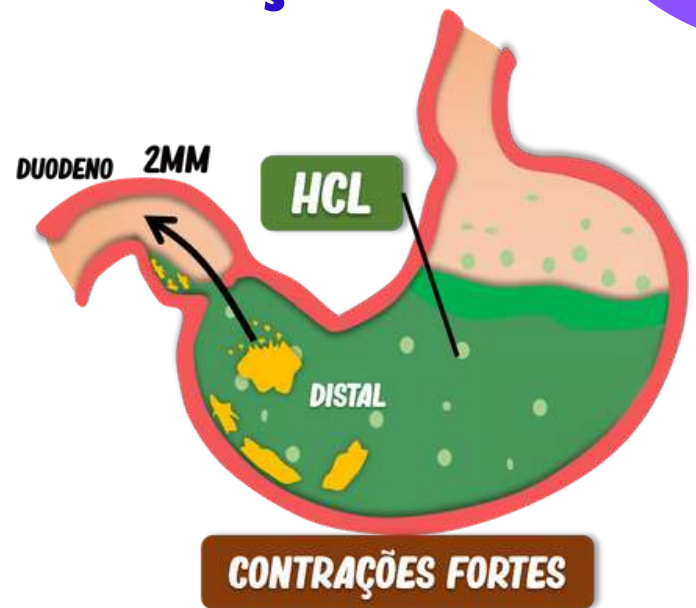
A demanda por ácidos biliares é grande para a síntese de bile. Após fazer a sua função, quando chega no íleo os ácidos biliares são reabsorvidos e entram na circulação porta. Ao chegar nos sinusóides, os hepatócitos reciclam a molécula para síntese de mais bile. Esta circulação é conhecida como **circulação entero-hepática.**

DIGESTÃO E ABSORÇÃO

A digestão e a absorção são processos distintos, mas estão totalmente relacionados. A digestão é a quebra do nutriente em micromoléculas. A absorção é a passagem das micromoléculas pelo epitélio intestinal.



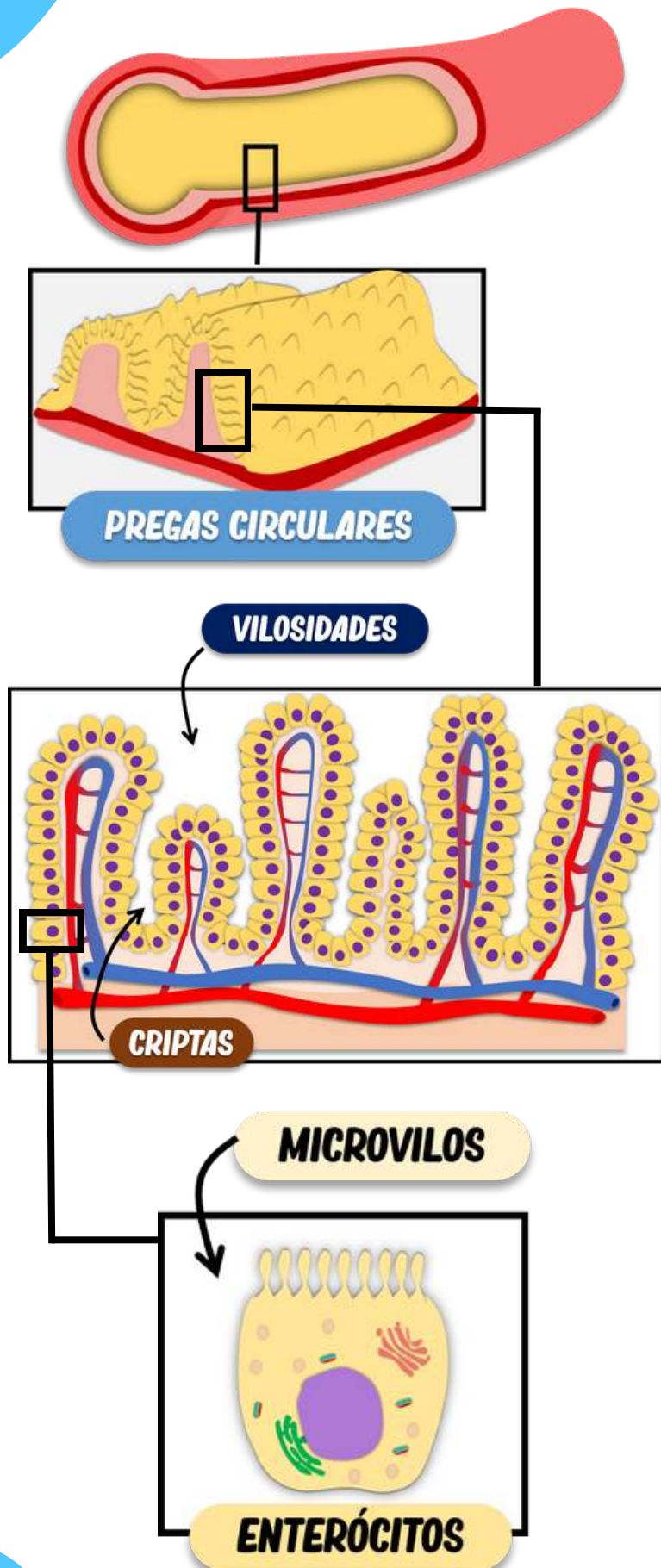
Para ocorrer digestão, o primeiro passo é a quebra física do alimento. A quebra física se inicia na boca com a mastigação e finaliza no estômago distal com as contrações fortes e exposição ao HCL.



Além da quebra física, há início da digestão química pela ação da amilase salivar de algumas espécies (digestão de amido) e pela ação da pepsina secretada pelo estômago (digestão de proteínas).

Intestino delgado

A fase final da digestão e absorção ocorre no intestino delgado, principalmente no duodeno. Para que estes processos ocorram com eficiência, a mucosa se projeta em três níveis para aumentar superfície de contato com a ingesta.



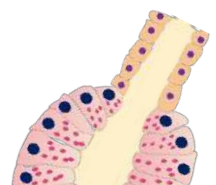
O primeiro nível de projeção ocorre com as **pregas circulares**, mas elas não estão presentes em todas as espécies.

No segundo nível, a mucosa emite projeções microscópicas em direção ao lúmen, que são as **vilosidades**. Na base das vilosidades, existem as **criptas**. Tanto as vilosidades quanto as criptas são recobertas pelos **enterócitos**.

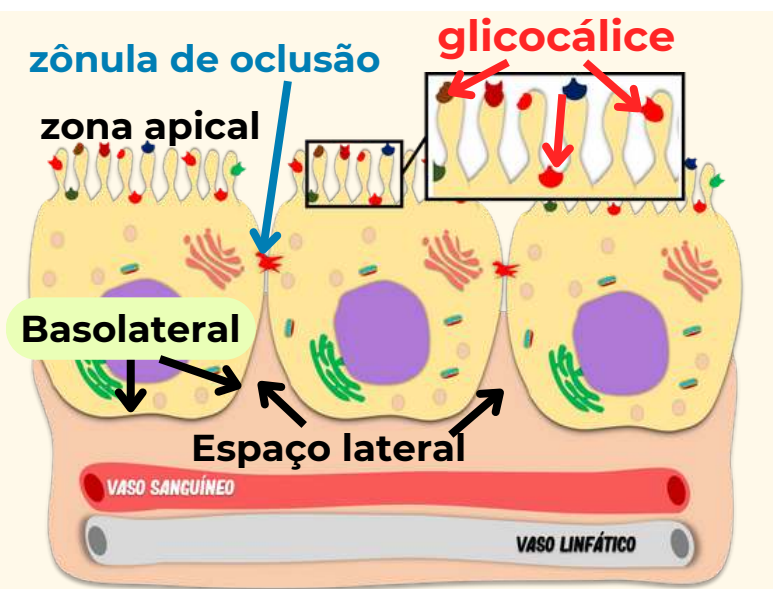
Cada um dos enterócitos emite inúmeras projeções citoplasmáticas conhecidas como **microvilosidades**.

Estes três níveis de projeção da mucosa servem para aumentar inúmeras vezes a superfície de contato com a ingesta e, consequentemente, permite que os processos de digestão e absorção ocorram.

Os enterócitos possuem uma configuração diferente para facilitar a digestão e absorção.



A superfície voltada para o lúmen é a **zona apical**. Na zona apical, existem glicoproteínas (enzimas e proteínas de transporte) aderidas formando uma estrutura conhecida como **glicocálice**.



Um enterócito fica ligado ao outro pela **zônula de oclusão** (estrutura que permite apenas a passagem de água e eletrólitos). A membrana que não está voltada para o lúmen é a **membrana basolateral**. O espaço entre um enterócito e outro é o **espaço lateral**.

Próximo aos enterócitos existem vasos sanguíneos e linfáticos.

Os nutrientes fazem o seguinte caminho na absorção:

Zona apical → Membrana basolateral → Espaço lateral → Circulação.

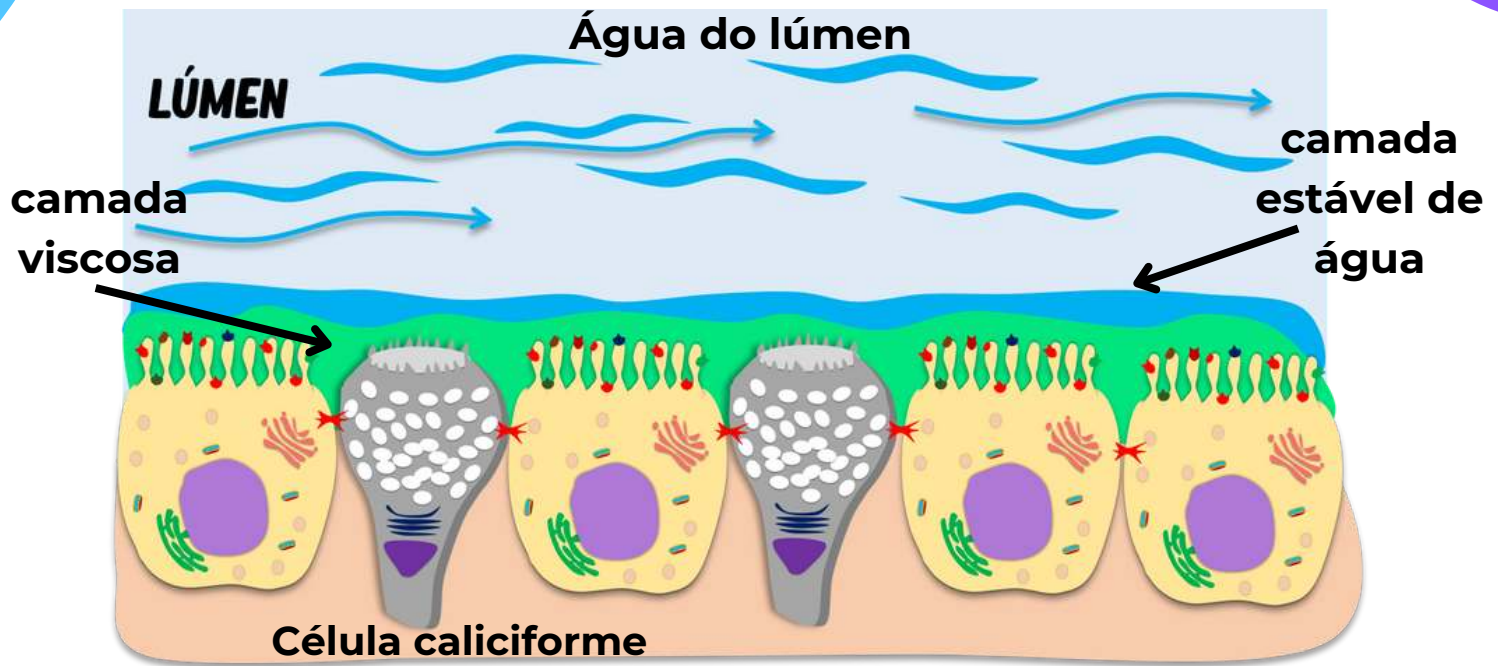
Microambiente

A estrutura do intestino delgado permite que um microambiente adequando para os processos digestivos e absorptivos seja formado.

Entre os enterócitos existem as células **caliciformes** responsáveis pela secreção de **muco**. O muco combinado com o glicocálice formam uma **cobertura viscosa**.

A água presente no centro do lúmen do TGI passa com certa velocidade, mas a água próxima da superfície entra em contato com a camada viscosa e passa com velocidade menor, formando a **camada estável de água**.





A camada estável de água e a camada viscosa formam uma barreira para segurar os nutrientes e permite a difusão dos mesmos.

Digestão química

A digestão química ocorre pelo processo de **hidrólise**. Hidrólise é a separação das ligações químicas pela adição de água.

Existem duas classes de enzimas:

Enzimas luminais: secretadas pelas glândulas e são misturadas à ingesta.

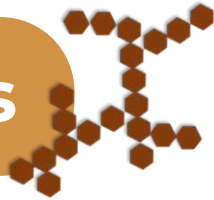
Enzimas de membrana: ficam ligadas na superfície apical do enterócito e fazem parte do glicocálice.

Estas duas classes de enzimas dão origem a duas fases da digestão: **fase luminal** e a **fase de membrana**. A fase de membrana ocorre no microambiente formado pela camada viscosa e camada estável de água.

Vamos ver o processo de digestão química e absorção das proteínas, lipídeos e carboidratos.

A camada estável de água e a camada viscosa formam uma barreira para segurar os nutrientes e permite a difusão dos mesmos.

Carboidratos

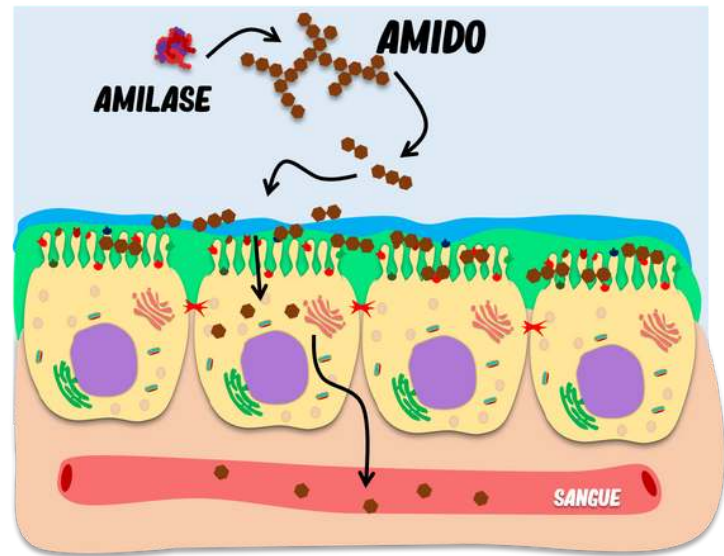


Os carboidratos são constituídos por açúcares simples (sacarídeos) repetidos. Temos monossacarídeos, dissacarídeos, trissacarídeos e assim por diante.

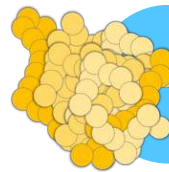
Dentre os carboidratos, o **amido é o único que precisa passar pela digestão luminal**. A molécula é quebrada pela amilase (salivar e pancreática) gerando dissacarídeos e trissacarídeos.

Após a quebra, estes elementos são direcionados para a fase de membrana junto com outros carboidratos que não passaram pela digestão luminal.

Os enterócitos possuem uma enzima específica para cada carboidrato.



Na fase luminal, as moléculas são reduzidas a monossacarídeos e absorvidas passando pela membrana apical, membrana basolateral, espaço lateral e entram no vaso sanguíneo.



Proteínas

A digestão de proteínas é realizada por diversas enzimas:

Pepsina: secretada pelo estômago na forma inativa (pepsinogênio). Ativada ao entrar em contato com o suco gástrico.

Tripsina: Secretada pelo pâncreas na forma inativa, e ativada na luz do duodeno.

Importante saber!



A tripsina é ativada pela enteroquinase (enzima secretada pelo duodeno). Após ativada, ela inicia uma cascata de ativação, ativando várias outras proteases. Este mecanismo impede sua ativação dentro do pâncreas.

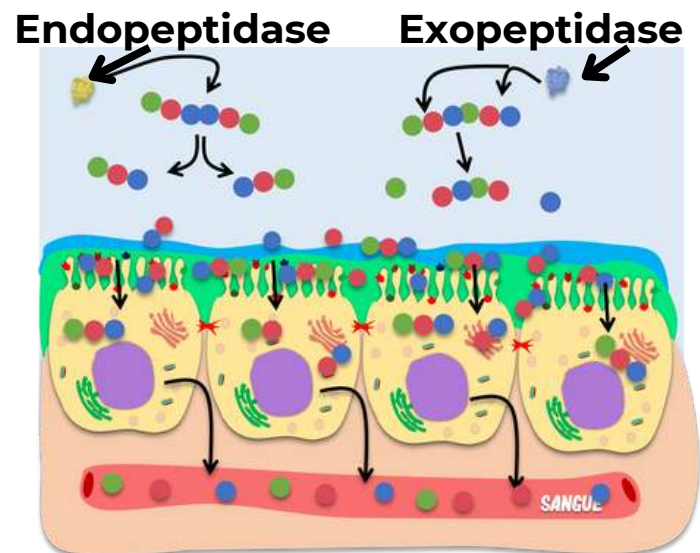
Tipos de proteases

Endopeptidases: são aquelas que quebram a molécula em pontos internos gerando cadeias curtas de aminoácidos.

Exopeptidases: Quebram as cadeias de aminoácidos pelas pontas liberando aminoácidos livres.

Ao chegarem na fase de membrana são quebradas mais vezes, o que gera aminoácidos livres, dipeptídeos e tripeptídeos.

As proteínas podem ser absorvidas na forma de dipeptídeos tripeptídeos, além de aminoácidos livres. Logo depois são **digeridas por proteases intracelulares** e só entram no sangue na forma de aminoácidos livres.

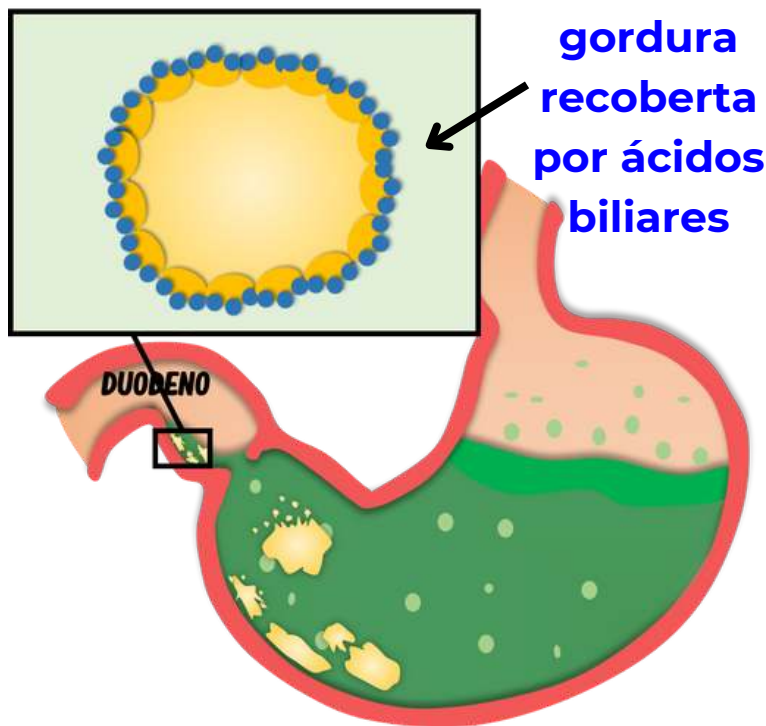


Lipídeos

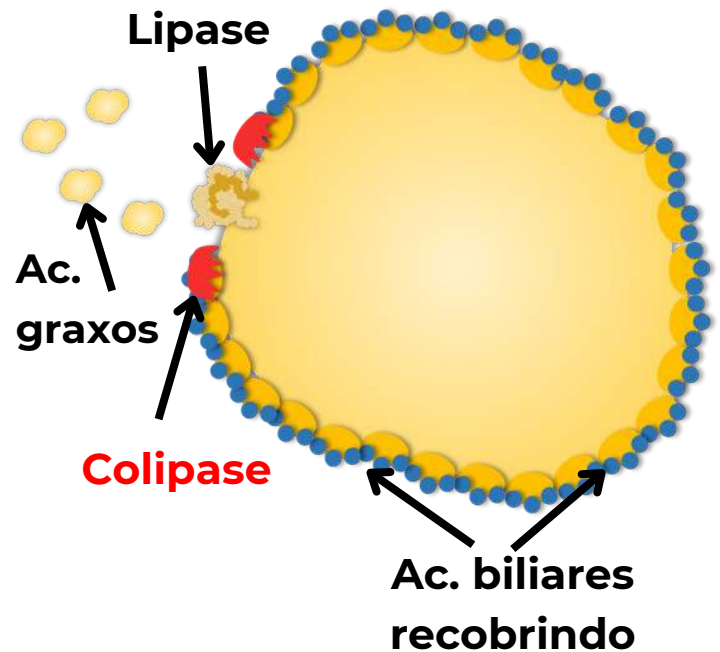
A digestão dos lipídeos é dificultada por se tratar de moléculas hidrofóbicas. Por este motivo precisam de um processamento diferente de outros nutrientes. Pode ser dividida em quatro etapas:

Etapas do processamento:

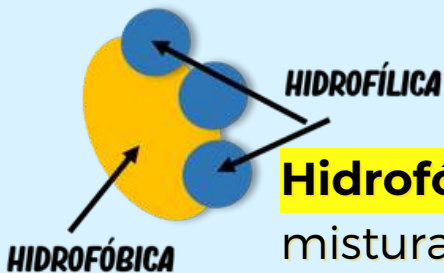
Emulsificação: se inicia no estômago distal com **aquecimento, agitação e mistura**, e finaliza no duodeno com a **ação detergente dos ácidos biliares**.



Hidrólise: feita pela **lipase** e **colipase** (enzimas pancre-áticas). A colipase abre a passagem entre os ácidos biliares para que a lipase possa agir. A lipase degrada a gordura liberando ácidos graxos.



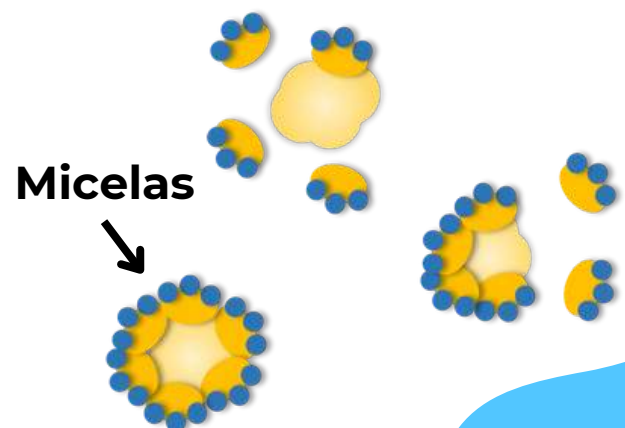
Ácidos biliares



Hidrofóbica: não se mistura com água e possui afinidade pela gordura

Hidrofílica: porção solúvel em água.

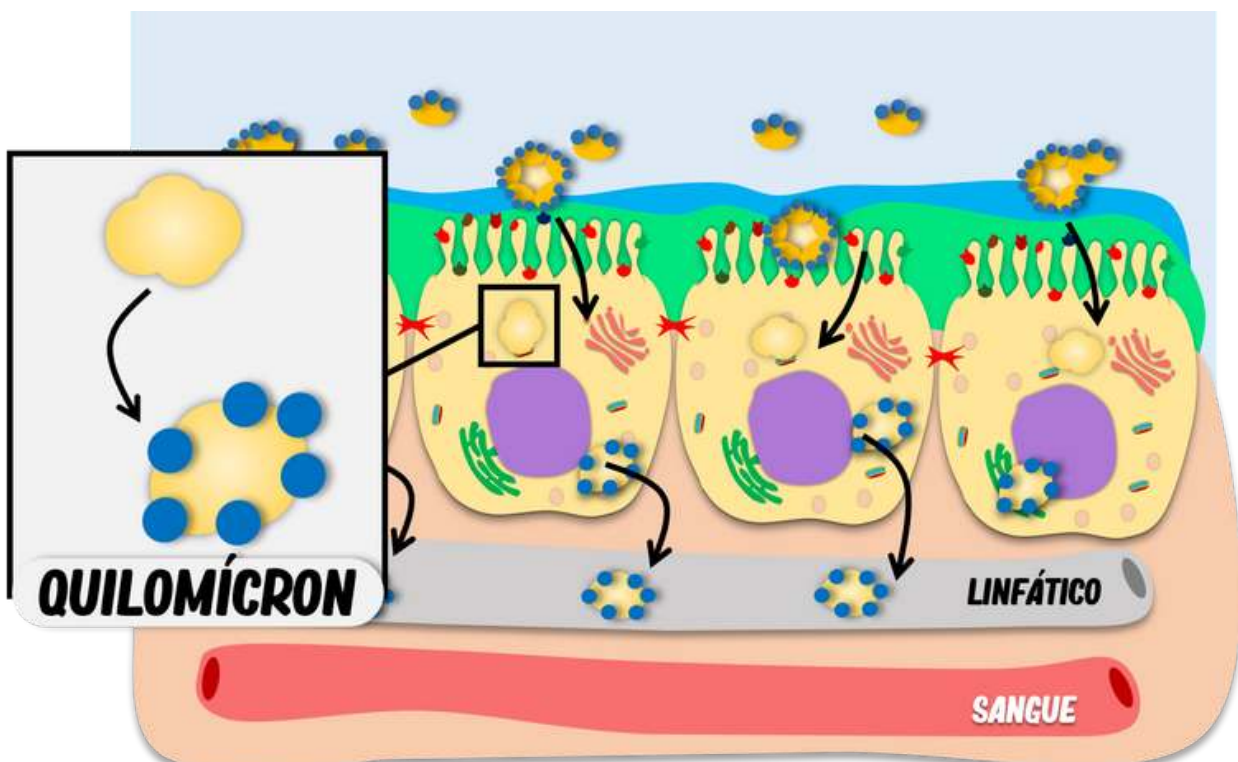
Formação de micelas: após a liberação dos ácidos graxos, os ácidos biliares se combinam com eles e formam as micelas.



As micelas são hidrofóbicas ao centro e hidrofílica na poção externa. Esta característica permite que a gordura fique solúvel em água.

Absorção: Os lipídeos podem passar facilmente pela membrana dos enterócitos, mas os ácidos biliares não são absorvidos neste momento. No meio intracelular, as moléculas são empacotadas com proteínas e formam os **quilomícrons**. Os quilomícrons entram nos vasos linfáticos ao invés dos vasos sanguíneos.

Os ácidos biliares são reabsorvidos ao chegarem no íleo. Os hepatócitos capturam a molécula e recicla pra síntese de um novo conteúdo biliar. Esta circulação das moléculas entre o fígado e o intestino é conhecida como **circulação entero-hepática**. Este processo ocorre várias vezes ao dia.



Os quilomícrons são hidrossolúveis e podem ser transportados na linfa.

APROVEITAMENTO DE NUTRIENTES APÓS ABSORÇÃO

31

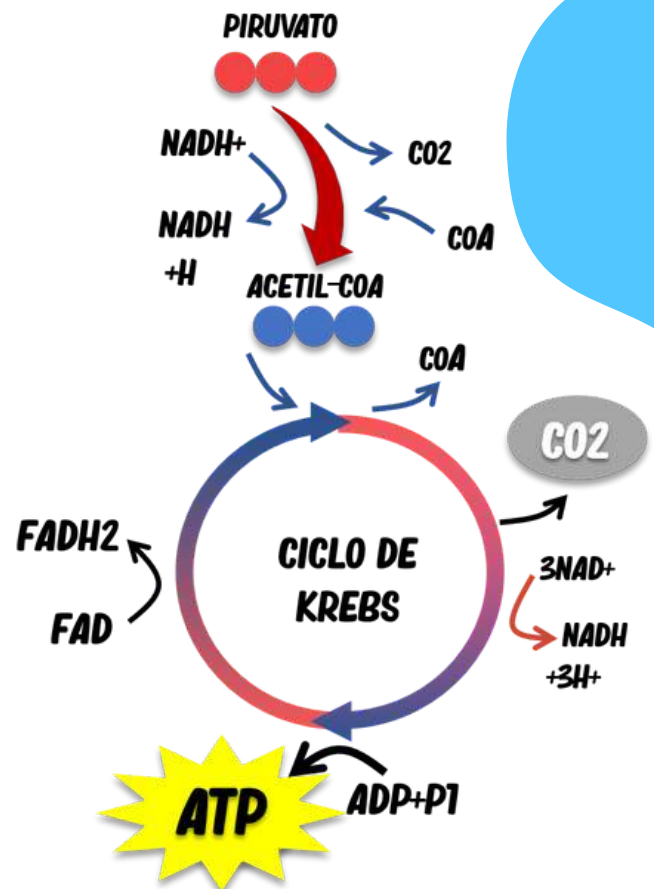
Durante a digestão, os nutrientes são reduzidos a micromoléculas e depois absorvidos pelo epitélio intestinal.

Uma vez dentro da circulação, o organismo precisa aproveitá-los para manter o funcionamento do corpo. Estes nutrientes são utilizados para formar energia, e por isso são chamados de **combustíveis metabólicos**.

As proteínas, lipídeos e carboidratos (principalmente a glicose) podem ser direcionados ao ciclo de Krebs para gerar energia na forma de **ATP**. O ATP é a fonte de energia química para os processos fisiológicos.

Combustíveis:

Glicose: é o combustível metabólico básico e uma das poucas moléculas utilizadas pelo sistema nervoso central. Pode ser armazenada no fígado e músculo esquelético na forma de glicogênio (glicogênese) e pode ser sintetizada a partir de outras moléculas (gliconeogênese).



Ácidos graxos: armazenam muita energia de forma compactada. São armazenados como triglicerídeos no tecido adiposo e podem ser convertidos em corpos cetônicos como alternativa à glicose.

A utilização dos nutrientes é dividida em três fases: fase de absorção, fase pós absorção e períodos de jejum prolongado/desnutrição.

Fase de absorção

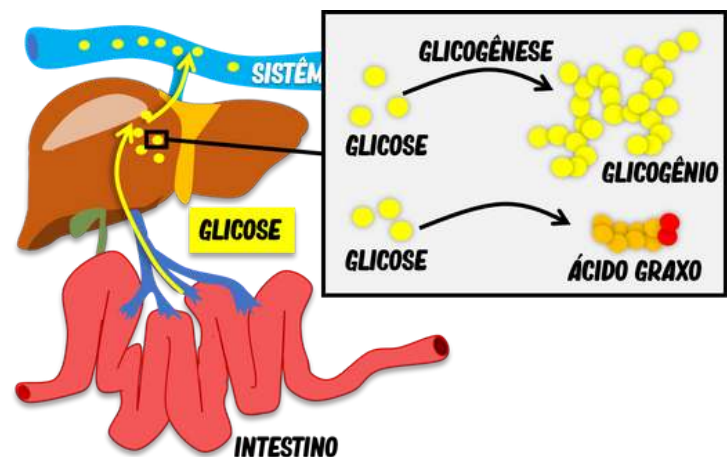
Esta fase ocorre quando os nutrientes estão sendo digeridos e absorvidos no intestino, e sendo direcionados para a corrente sanguínea.

Importante saber!

Maioria dos nutrientes são absorvidos e caem na veia porta, e são direcionados ao fígado. O fígado fica em uma posição sentinela, de forma que os nutrientes passam por ele e são metabolizados. Pequena parte chega na circulação sistêmica. As gorduras entram na circulação linfática.

O fígado capta grande parte da glicose e uma pequena parte vai para a circulação sistêmica.

As moléculas capturadas pelo fígado são **transformadas em glicogênio** (glicogênese) e outra parte é **transformada em ácido graxos** para formar estoque no tecido adiposo.

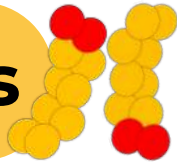


Glicose

Quando os carboidratos estão sendo digeridos e absorvidos, o pâncreas inicia a secreção de insulina para preparar os órgãos e tecidos para a chegada da glicose.

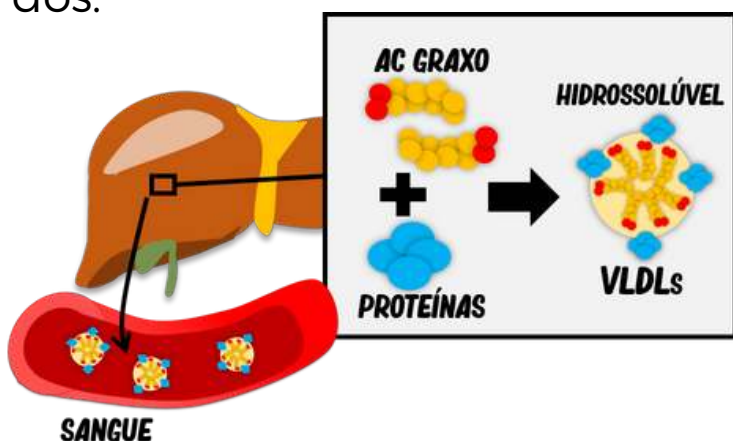
A glicose que foi para a circulação sistêmica pode ser utilizada como fonte de energia pelos tecidos periféricos, mas também vão formar estoque de glicogênio no músculo esquelético ou podem ser transformadas em gordura pelo tecido adiposo.

Ácidos graxos



Os ácidos graxos formados no fígado a partir da glicose precisam ser transferidos para o tecido adiposo para armazenamento. Por conta disto, eles são empacotados com proteínas que os tornam **hidrossolúveis**. As moléculas passam a ser conhecidas como **lipoproteínas de muito baixa densidade (VLDLs)**.

O lipídeos absorvidos no intestino formam os quilomícrons. Os VLDLs e os quilomícrons são semelhantes. Desta forma, ambos são transferidos para o tecido adiposo e ficam estocados.

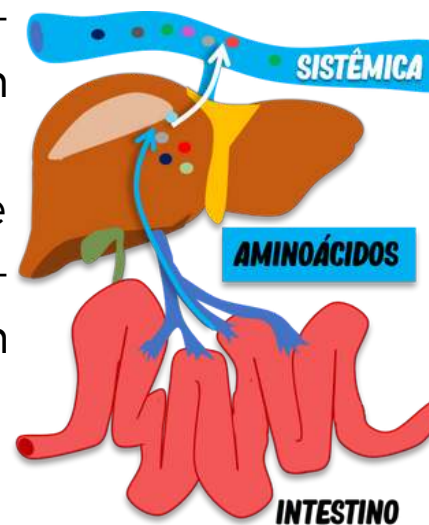


Aminoácidos

Os aminoácidos são complexos e existem inúmeras classificações. Além disto, muitos deles são modificados no processo de absorção.

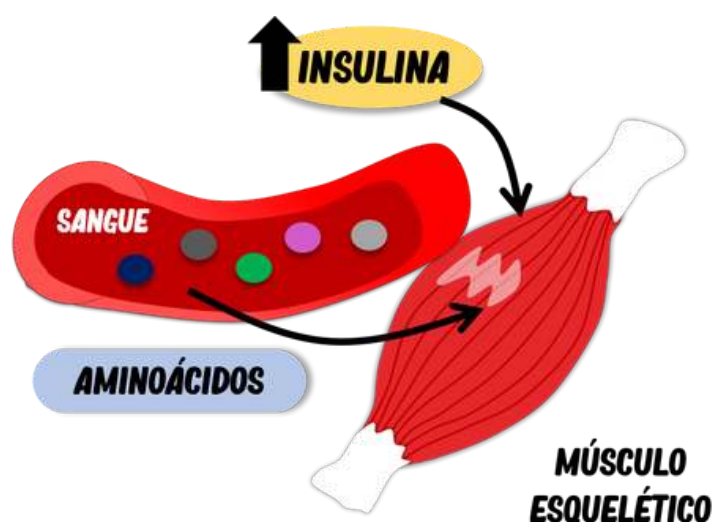
Grande parte dos aminoácidos absorvidos são capturados pelo fígado e uma pequena parcela escapa para a circulação sistêmica.

Dos aminoácidos absorvidos pelo fígado, cerca de 20% é utilizado para a síntese proteica (globulinas, albumina, fatores de coagulação) e o restante é transformado em glicose (gliconeogênese) ou transformados em ácidos graxos.



Aqueles aminoácidos que escaparam do metabolismo hepático e foram para a circulação sistêmica são usados para a síntese proteica em outros tecidos periféricos. O tecido muscular utiliza grande quantidade de aminoácidos para síntese de proteínas.

A insulina promove a captação e de aminoácidos e anabolismo pelo músculo esquelético. Além disso, **a glicose** que escapou do metabolismo hepático também é capturada e **transformada em glicogênio** para que o músculo possa utilizar em seu metabolismo. O tecido muscular funciona como uma reserva de aminoácidos para períodos de necessidade.



Fase pós-absorção

Na fase de absorção, os nutrientes são metabolizados e formam estoque. Na fase pós-absorção, estes estoques serão mobilizados para manter os níveis séricos adequados.

Mobilização de glicose

Conforme a absorção de glicose diminui, a glicemia e **os níveis de insulina também começam a cair e os níveis de glucagon começam a subir.**

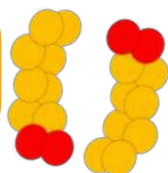
O glucagon promove a quebra do glicogênio (glicogenólise) para jogar glicose no sangue e manter as concentrações adequadas. Além disso, o hormônio também estimula a **transformação dos aminoácidos** (mobilizados do músculo) **em glicose** (gliconeogênese).

Mobilização de aminoácidos



Com a diminuição das concentrações séricas de insulina, os aminoácidos começam a ser mobilizados do tecido muscular e caem no sangue. Com isso, são direcionados ao fígado e **transformados em glicose por meio do glucagon** (gliconeogênese). O cortisol também pode estimular a mobilização de aminoácidos, gliconeogênese e a glicogenólise.

Mobilização de ácidos graxos



A diminuição de insulina promove a lipólise para liberar ácidos graxos no sangue. Quando são liberados, se ligam à albumina e se tornam **ácidos graxos não esterificados**.

Eles podem ser usados diretamente para a produção de energia pelos tecidos periféricos, mas grande parte é levada ao fí-

gado para gerar VLDLs e **corpos cetônicos**. Os corpos cetônicos não são utilizados pelo fígado, mas são utilizados pelos tecidos periféricos para a produção de energia.

Períodos de insuficiência energética

Em períodos onde a ingestão de glicose é insuficiente para suprir as necessidades energéticas do animal, os aminoácidos não podem ser mobilizados, já que isso levaria à fraqueza muscular extrema.

Neste caso, os estoques de gordura são utilizados como fonte de energia. Os ácidos graxos não esterificados são liberados no sangue e podem ser usados pelos tecidos, mas grande parte vai para o fígado. No fígado, eles podem ser oxidados para formar ATP, podem ser esterificados para formar triglicerídeos ou podem ser metabolizados em corpos cetônicos para suprir as necessidades energéticas do animal.



DIGESTÃO FERMENTATIVA

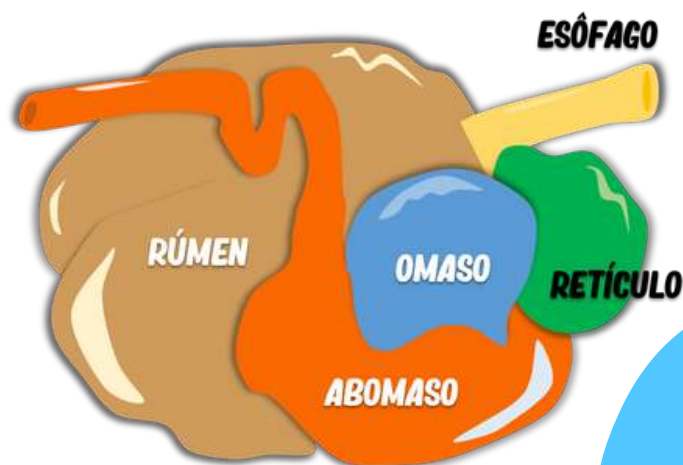
36

As fibras são componentes da dieta que não podem ser hidrolisados por enzimas secretadas pelas glândulas dos animais e necessitam de uma digestão diferenciada, a digestão fermentativa.

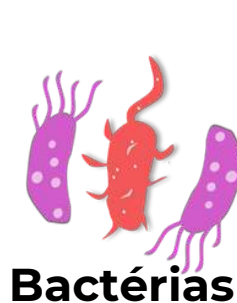
Estas moléculas são digeridas por enzimas de origem microbiana. Os microrganismos responsáveis pela digestão fermentativa ficam em locais específicos no trato digestório dos animais.

Os ruminantes possuem compartimentos anteriores ao estômago, conhecidos como **pré-estômagos** (rúmen, retículo e omaso). Os herbívoros monogástricos possuem compartimentos distais ao intestino delgado, que são o **ceco** e o **cólon**.

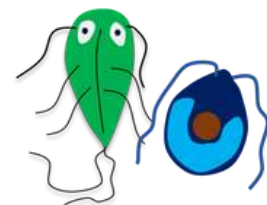
Estes compartimentos oferecem um ambiente favorável para o crescimento microbiano, com forças iônicas, pH, umidade e outras coisas mantidas em uma faixa ideal.



Ecosistema nos compartimentos



Bactérias



protozoários



Fungos

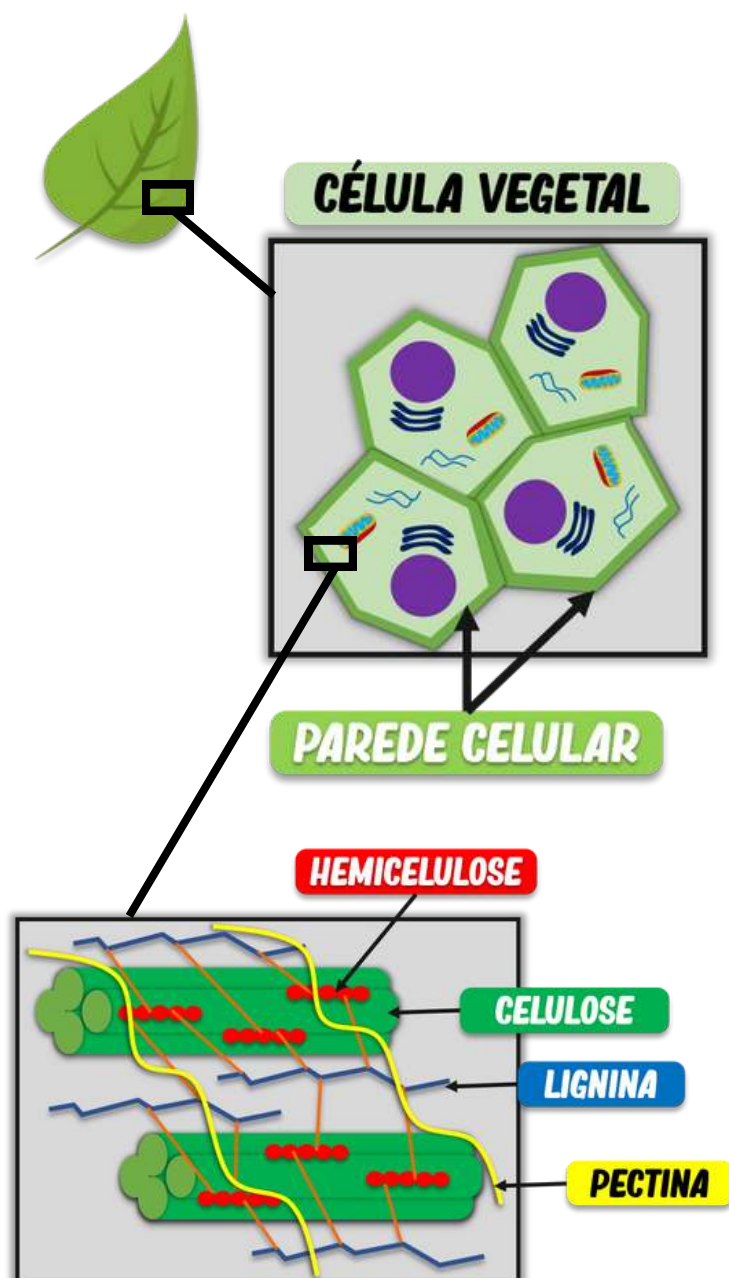
O ecossistema é formado por **bactérias**, **fungos** e **protozo-ários**. A população bacteriana é formada por aproximadamente 28 espécies de bactérias, sendo a maior parte anaeróbica estrita. Os protozoários estão presentes em grandes quantidades e são importantes para a fermentação. Outra função deles é ingerir bactérias para controlar o crescimento microbiano. Os fungos também desempenham papel na fermentação.

Neste ambiente, a excreção de um microrganismo muitas vezes é utilizada por outro, de forma que um contribui para o crescimento do outro.

Substratos da fermentação

Os animais herbívoros se alimentam principalmente de folhas. As células vegetais possuem uma parede celular, que é formada por alguns componentes: **celulose**, **hemicelulose**, **pectina** e **lignina**. Estes componentes são conhecidos como fibras.

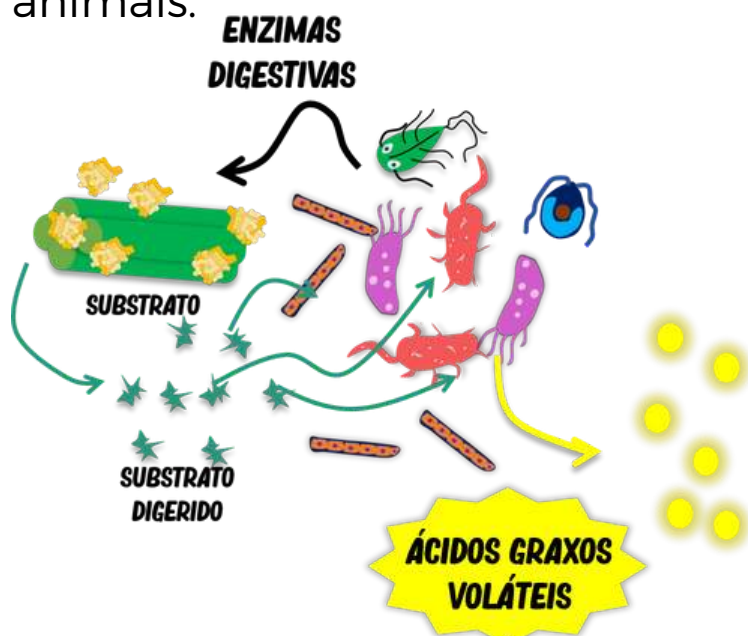
- **Celulose:** carboidrato estrutural que fornece resistência.
- **Hemicelulose:** fornece elasticidade.
- **Lignina:** confere rigidez
- **Pectina:** aprisiona água para formar m gel



Fermentação

Não apenas as fibras, mas qualquer nutriente que entre no compartimento fermentativo pode ser atacado pelos microrganismos.

Quando o substrato cai no compartimento, as enzimas microbianas atacam e digerem os nutrientes. Uma vez digeridos, as moléculas se tornam disponíveis para o aproveitamento microbiano. Os microrganismos absorvem as moléculas e produzem os **ácidos graxos voláteis (AGVs)**. Os AGVs são excretados pelos microrganismos, mas servem para suprir as necessidades energéticas dos animais.



Os principais AVGs são: **ácido propiônico, ácido butírico e ácido acético**. O ácido acético está relacionado à produção de gás metano.



Ruminantes

Nos ruminantes, os AGV representam de 60% a 80% das necessidades energéticas do animal. Quando eles são produzidos e vão se acumulando no rúmen, o pH se torna ácido, o que é prejudicial ao crescimento microbiano.

Para que o crescimento dos microrganismos não seja prejudicado, a saliva dos ruminantes possui altas quantidades de bicarbonato para neutralizar os ácidos do rúmen. Outro aspecto importante é que os AGVs não se acumulam em grande quantidade, pois eles são absorvidos pelo epitélio ruminal.

Aproveitamento de proteínas

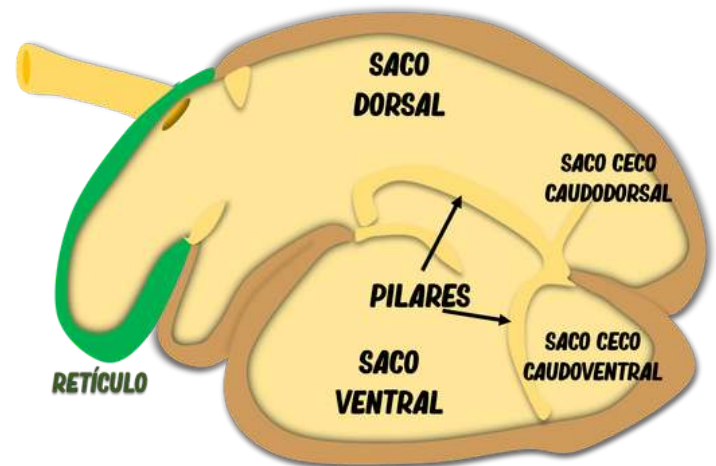
Os ruminantes necessitam de proteínas assim como outros animais, mas elas são fermentadas quando caem no rúmen e o animal não consegue absorver.

No entanto, eles podem aproveitar as proteínas microbianas. Quando os microrganismos são levados para o abomaso ou para o intestino delgado, as proteínas sintetizadas podem ser digeridas e absorvidas pelo ruminante.

Os microrganismos podem sintetizar proteínas a partir de fontes não proteicas de nitrogênio, como amônia, ureia e nitrato. Estes componentes podem ser adicionados na dieta do animal. No rúmen, assim como no cólon de herbívoros monogástricos, existe um mecanismo de reciclagem de ureia. A ureia do organismo é excretada direta no rúmen para que os microrganismos possam sintetizar proteínas.

Anatomia e fisiologia dos pré-estômagos

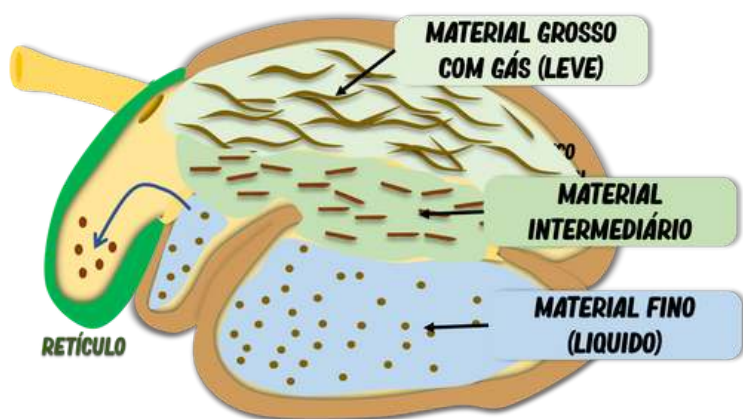
Os pré-estômagos são: rúmen, retículo e omaso. O rúmen é composto por pilares que dividem o compartimento em sacos dorsais e ventrais.



Os pré-estômagos possuem padrões de motilidade para garantir a digestão e absorção. Os padrões são: **contrações primárias e contrações secundárias.**

Primárias: separam a ingesta em camadas. No saco dorsal, fica o conteúdo com gás (mais leve); o conteúdo é fermentado e quebrado em partículas menores. As partículas menores (mais pesadas) descem e se acumulam no saco ventral.

As partículas intermediárias ficam entre essas duas camadas. Desta forma, podemos observar três camadas de material no rúmen.



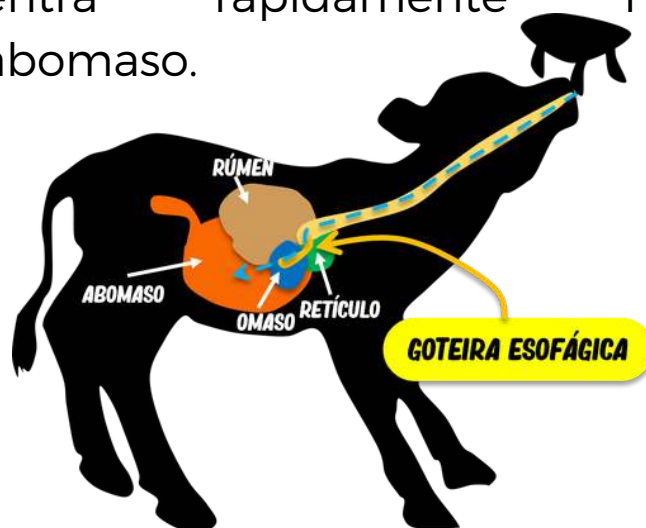
Secundárias: As contrações secundárias também são chamadas de **eructação**. Consiste em uma contração do saco dorsal que empurra o gás acumulado em sentido cranial, em direção ao esôfago para que ele seja expelido.

Ruminação: Outro padrão importante é aquele que origina a ruminação. Consiste em uma contração extra do retículo que desloca o alimento em sentido oral, para que o mesmo seja remastigado. Esta contração ocorre antes da contração primária.

Desenvolvimento do rúmen

Quando os bezerros e cordeiros começam a ingerir alimentos sólidos, os pré-estômagos vão sendo colonizados por microrganismos do ambiente. Com isto, o rúmen vai crescendo juntamente com as papilas.

Enquanto ainda estão sendo amamentados, o leite não pode cair no rúmen, já que ocorreria a fermentação do mesmo. Para que isso não ocorra, existe uma estrutura chamada **goteira esofágica**. Consiste em uma "calha" que desvia, em grande parte, o leite direto para o canal omasal. Cerca de 10% apenas do leite cai no rúmen e o restante entra rapidamente no abomaso.



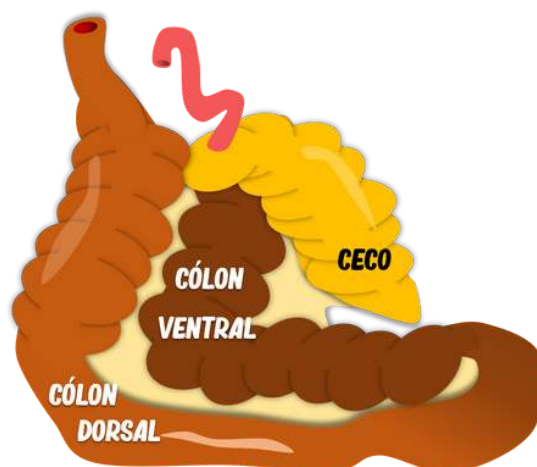
Equinos



O intestino grosso (IG) dos equinos (ceco e cólon), foi desenvolvido para realizar fermentação assim como os pré-estômagos. No entanto, o alimento passa pelo estômago onde é submetido ao ácido clorídrico; o HCL facilita a ação das bactérias no intestino grosso. As proteínas e carboidratos (como o amido) são digeridos e absorvidos no intestino delgado.

As fibras e alguns carboidratos não absorvidos chegam ao intestino grosso e são fermentados. Os microrganismos não conseguem fermentar as proteínas da dieta, pois não chegam ao IG. Estes animais possuem mecanismos para excretar a ureia diretamente no IG, de forma que os microrganismos aproveitam estas fontes para síntese proteica.

Os equinos, diferentemente dos ruminantes, não podem aproveitar as proteínas de origem microbiana, pois o IG não possui um mecanismo eficiente para recuperá-las.



Outras espécies

Em outras espécies que também fazem fermentação, o IG pode variar muito anatomicamente, mas também é capaz de realizar fermentação para suprir as necessidades energéticas do animal.

Em ruminantes, o intestino grosso também é desenvolvido e capaz de realizar fermentação, mesmo que o alimento já tenha passado pelos pré-estômagos.



AjudaVet

Veterinária descomplicada: do livro para a prática

Acesse este material no AjudaVet

Versão atualizada, artigos relacionados, quizzes e flashcards sobre este tema — direto na página do material.

ajuda-vet.com/materiais/fisiologia-sistema-digestorio



Aponte a câmera do celular para abrir este material

Baixe outros materiais em ajuda-vet.com/materiais