CAPITOLO

8

L'alimentazione e l'apparato digerente

Nulla di ciò che mangiamo entra in una cellula così com'è: per diventare noi, il cibo deve prima essere smontato.

OBIETTIVI

1. Riconoscere i gruppi di nutrienti e calcolare l'energia di un alimento dai dati dell'etichetta.
2. Descrivere l'organizzazione dell'apparato digerente e la struttura della parete del canale alimentare.
3. Spiegare la digestione meccanica e chimica tratto per tratto, indicando per ogni enzima substrato e prodotti.
4. Collegare pliche, villi e microvilli all'assorbimento e distinguere la via del sangue da quella della linfa.
5. Descrivere le funzioni del fegato e del pancreas e la regolazione nervosa e ormonale della digestione.
6. Applicare le conoscenze alla salute: dieta equilibrata, disturbi digestivi, prevenzione.

INDICE DEL CAPITOLO

8.1 Gli alimenti e i nutrienti 2
8.2 L'organizzazione dell'apparato digerente 5
8.3 La digestione, tratto per tratto 8
8.4 L'assorbimento e l'intestino crasso 14
8.5 Fegato, pancreas e regolazione della digestione 17

Scienze naturali 4 · Parte IV · Il corpo umano: nutrizione, scambi e difesa · versione 1.0
Capitolo 8: L'alimentazione e l'apparato digerente · pagine 205–228 del volume completo · estratto per lo studio

Un piatto di pasta e fagioli, una mela, un bicchiere d'acqua: in poche ore il corpo li trasforma in molecole abbastanza piccole da attraversare la parete dell'intestino ed entrare nel sangue. L'amido diventa glucosio, le proteine dei legumi diventano amminoacidi con cui costruirai le tue proteine, l'olio diventa acidi grassi. Lo smontaggio è affidato a un lungo tubo, a qualche ghiandola e a decine di enzimi diversi.

È il primo dei capitoli sul corpo umano di questo volume: i tessuti, l'omeostasi e il feedback negativo, studiati lo scorso anno (*Scienze naturali 3*, cap. 14), saranno strumenti di lavoro continui.

8.1 Gli alimenti e i nutrienti

8.1.1 Che cosa ci serve mangiare

Gli *alimenti* sono ciò che mangiamo; i **nutrienti** sono le sostanze contenute negli alimenti che il corpo usa per ricavare energia, per costruire e riparare i tessuti e per regolare le proprie funzioni. Si distinguono sei gruppi: carboidrati, lipidi e proteine, che servono in quantità dell'ordine di decine o centinaia di grammi al giorno e perciò si chiamano *macronutrienti*; vitamine e sali minerali, i *micronutrienti*, necessari in milligrammi o microgrammi; e l'acqua.

> **DA RICORDARE**
>
> **Richiamo.** Carboidrati, lipidi, proteine e acidi nucleici sono le biomolecole: i polimeri si formano dai monomeri per condensazione e si scindono per idrolisi, con l'aggiunta di una molecola d'acqua per ogni legame rotto (*Scienze naturali 2*, cap. 2). Gli enzimi sono catalizzatori proteici, con un sito attivo specifico per il substrato (*Scienze naturali 2*, cap. 5; vedi anche cap. 4). La digestione chimica è una serie di idrolisi catalizzate da enzimi.

I **carboidrati** sono la principale fonte di energia della dieta. Gli zuccheri semplici, come glucosio, fruttosio, saccarosio e lattosio, si trovano nella frutta, nel latte e nei dolci; i carboidrati complessi, soprattutto l'amido, nei cereali, nelle patate e nei legumi. Il glucosio è il combustibile preferito di quasi tutte le cellule e, in condizioni normali, quasi l'unico del cervello. Dei polisaccaridi vegetali fa parte anche la **fibra alimentare**, l'insieme dei carboidrati che i nostri enzimi non riescono a idrolizzare, come la cellulosa. La fibra non è inutile: dà volume al contenuto intestinale, ne regola il transito, aumenta il senso di sazietà ed è in parte fermentata dai batteri del colon.

I **lipidi** forniscono più del doppio dell'energia dei carboidrati a parità di massa. Nella dieta sono soprattutto trigliceridi, esteri del glicerolo con tre acidi grassi (il gruppo estere è descritto nel cap. 7), insieme a fosfolipidi e colesterolo. Oltre a costituire la riserva di energia del tessuto adiposo, i lipidi formano le membrane cellulari, sono il punto di partenza degli ormoni steroidei e trasportano le vitamine liposolubili. Due acidi grassi, l'acido linoleico e l'acido α-linolenico, sono *essenziali*: il corpo non li sa produrre e deve riceverli con gli alimenti, soprattutto da oli vegetali, frutta secca e pesce.

Le **proteine** servono soprattutto a costruire: enzimi, anticorpi, proteine dei muscoli, del sangue e delle membrane. Il corpo le smonta in amminoacidi e le ricostruisce secondo le istruzioni dei propri geni (*Scienze naturali 3*, cap. 12). Dei venti amminoacidi delle proteine, nove sono **amminoacidi essenziali** per l'adulto, perché le nostre cellule non li sintetizzano: istidina, isoleucina, leucina, lisina, metionina, fenilalanina, treonina, triptofano e valina. Le proteine di carne, pesce, uova e latte li contengono tutti in buone proporzioni. Quelle dei cereali sono povere di lisina, quelle dei legumi di metionina: per questo piatti tradizionali come pasta e fagioli o riso e piselli si completano a vicenda.

Le **vitamine** sono molecole organiche necessarie in piccole quantità, che il corpo non sa produrre o produce in misura insufficiente. Non forniscono energia: molte sono i precursori dei *coenzimi*, piccole molecole che aiutano gli enzimi a lavorare. Le vitamine **idrosolubili** (la C e quelle del gruppo B) in genere si accumulano poco (fa eccezione la B_{12}, di cui il fegato conserva riserve per anni) e l'eccesso si elimina con l'urina: serve un apporto regolare. Le **liposolubili** (A, D, E, K) si accumulano nel fegato e nel tessuto adiposo, e un eccesso di A o di D, di solito da integratori, può essere tossico. Una carenza prolungata provoca malattie precise: senza vitamina C, necessaria per sintetizzare il collagene, compare lo *scorbuto*, con gengive sanguinanti e ferite che non guariscono; senza vitamina D, che il corpo produce anche nella pelle esposta al sole e che serve ad assorbire il calcio nell'intestino, le ossa dei bambini non si mineralizzano e si deformano (*rachitismo*). La vitamina K serve alla coagulazione del sangue (vedi cap. 10).

I **sali minerali** forniscono ioni con compiti specifici: il calcio entra nelle ossa e nei denti e serve alla contrazione muscolare e alla coagulazione; il ferro fa parte dell'emoglobina, che trasporta l'ossigeno (vedi cap. 9 e 10); lo iodio è indispensabile per gli ormoni della tiroide (vedi cap. 13), e per questo si raccomanda il sale iodato; sodio e potassio regolano gli scambi di acqua e i segnali nervosi. L'**acqua**, infine, è circa il 60 % della massa di un adulto: è il solvente delle reazioni cellulari e del trasporto, e ogni giorno se ne perde con urina, sudore, respiro e feci.

8.1.2 L'energia degli alimenti

L'energia che un alimento fornisce si misura in kilojoule (kJ) o nella vecchia unità kilocaloria (kcal), con 1 kcal = 4,184 kJ (vedi cap. 3). Le etichette dei prodotti venduti nell'Unione europea riportano l'energia per 100 g e la calcolano dalla composizione con fattori fissati dalla legge, il Regolamento (UE) n. 1169/2011, allegato XIV (Tabella 8.1). Sono valori medi di energia *metabolizzabile*, cioè di quella che il corpo riesce davvero a ricavare.

Tabella 8.1 Fattori di conversione per il calcolo dell'energia sulle etichette (Reg. UE 1169/2011, all. XIV).

Componente	kJ/g	kcal/g
carboidrati (esclusi i polialcoli)	17	4
proteine	17	4
grassi	37	9
alcol (etanolo)	29	7
fibre	8	2

Perché le proteine valgono 17 kJ/g, se bruciate in un calorimetro ne liberano di più? Perché il corpo non le ossida fino in fondo: l'azoto degli amminoacidi viene eliminato sotto forma di urea, una molecola che contiene ancora energia. E la fibra, che non digeriamo, vale 8 kJ/g perché i batteri del colon la fermentano in piccoli acidi che poi assorbiamo.

IN SINTESI

$$E\,(\text{kJ}) = 17 \cdot m_{\text{carboidrati}} + 17 \cdot m_{\text{proteine}} + 37 \cdot m_{\text{grassi}} + 29 \cdot m_{\text{alcol}} + 8 \cdot m_{\text{fibre}}$$

con le masse in grammi. Per le kcal si usano i fattori 4, 4, 9, 7 e 2.

ESEMPIO SVOLTO

L'energia di un'etichetta

Problema. L'etichetta di un pacchetto di cracker (valori di esempio) riporta per 100 g: grassi 10,0 g, carboidrati 70,0 g, fibre 4,0 g, proteine 10,0 g. Calcola l'energia per 100 g in kJ e in kcal, l'energia di una porzione di 30 g e la percentuale dell'energia che viene dai grassi.

Soluzione. Si moltiplica ogni massa per il suo fattore e si somma:

$$E = 10{,}0 \cdot 37 + 70{,}0 \cdot 17 + 4{,}0 \cdot 8 + 10{,}0 \cdot 17 = 370 + 1190 + 32 + 170 = 1762\ \text{kJ}$$

In kcal: $10{,}0 \cdot 9 + 70{,}0 \cdot 4 + 4{,}0 \cdot 2 + 10{,}0 \cdot 4 = 90 + 280 + 8 + 40 = 418$ kcal. Una porzione di 30 g fornisce 1762 kJ × 30/100 ≈ 529 kJ. Dai grassi vengono 370 kJ su 1762, cioè il 21 %.

Osservazione. Le kcal si calcolano con i propri fattori, non dividendo i kJ per 4,184: per questo 1762/4,184 = 421 non coincide esattamente con 418.

8.1.3 Fabbisogno energetico e dieta equilibrata

Anche a riposo il corpo consuma energia per respirare, far battere il cuore, mantenere la temperatura e i gradienti di ioni delle cellule. Il **metabolismo basale** è il consumo di energia di una

persona sveglia, a riposo, a digiuno da almeno dodici ore e in un ambiente a temperatura confortevole. Dipende dalla massa e dalla composizione del corpo (il muscolo consuma più del tessuto adiposo), dall'età e dal sesso. Al fabbisogno totale si aggiungono l'attività fisica, la spesa per digerire e, negli adolescenti, la crescita. Per la popolazione italiana i valori di riferimento di energia e nutrienti, per età e sesso, sono i *LARN* (Livelli di Assunzione di Riferimento di Nutrienti ed energia) della Società Italiana di Nutrizione Umana (SINU).

Nessun alimento da solo contiene tutto: una dieta equilibrata è varia. La **dieta mediterranea**, riconosciuta dall'UNESCO nel 2010 come patrimonio culturale immateriale dell'umanità, ne è un modello: abbondanti verdure, frutta, legumi e cereali, preferibilmente integrali; olio d'oliva come grasso principale; pesce, latticini e uova con moderazione; poca carne rossa e pochi dolci; acqua come bevanda. L'UNESCO non ha riconosciuto un elenco di cibi, ma un insieme di pratiche, dalla stagionalità alla convivialità.

Per descrivere lo stato nutrizionale di una popolazione si usa spesso l'**indice di massa corporea** (IMC, in inglese BMI): la massa in kilogrammi divisa per il quadrato della statura in metri, IMC = m/h^2. È utile negli studi sugli adulti, ma ha limiti evidenti: non distingue la massa muscolare da quella grassa né dice dove si trova il grasso, e nei bambini e negli adolescenti, che stanno crescendo, va interpretato solo con tabelle per età e sesso. Non è una diagnosi: il giudizio sul peso di una persona spetta al medico.

COLLEGAMENTI

Educazione alla salute · I disturbi del comportamento alimentare. Anoressia nervosa, bulimia nervosa e disturbo da alimentazione incontrollata (*binge eating*) sono malattie, non scelte o capricci: coinvolgono il corpo e la mente, iniziano spesso nell'adolescenza e si possono curare, tanto meglio quanto prima si interviene. Chi riconosce in sé o in un amico un rapporto difficile con il cibo e con il proprio corpo può parlarne con un adulto di fiducia, con il medico di famiglia o con un consultorio, che sanno indirizzare ai servizi specializzati del Servizio sanitario nazionale.

8.2 L'organizzazione dell'apparato digerente

8.2.1 Un tubo con ghiandole annesse

L'**apparato digerente** è formato da due parti. La prima è il **canale alimentare**, un tubo continuo che va dalla bocca all'ano, lungo circa 5–7 m in una persona viva: bocca, faringe, esofago, stomaco, intestino tenue (diviso in duodeno, digiuno e ileo), intestino crasso (cieco con l'appendice, colon e retto) e ano. La seconda sono le **ghiandole annesse**, che riversano nel canale le loro secrezioni attraverso dotti: le ghiandole salivari, il fegato con la cistifellea e il pancreas (Figura 8.1).

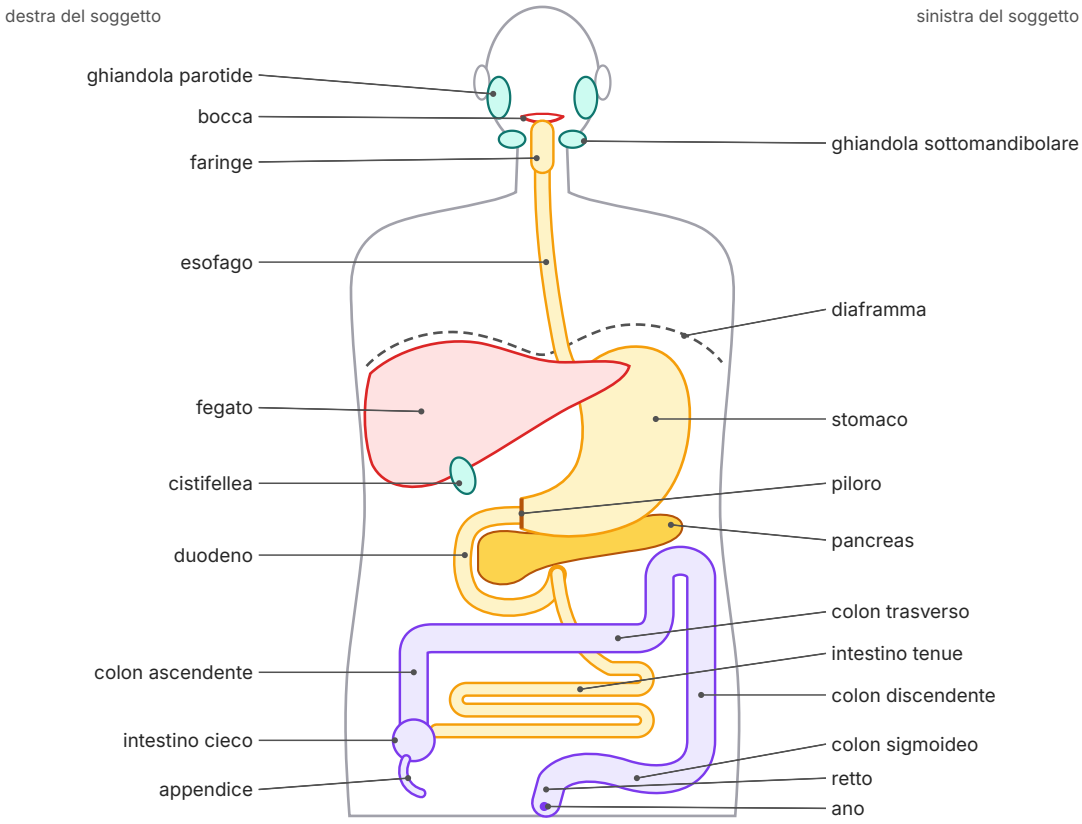


Figura 8.1 L'apparato digerente in visione anteriore (schema non in scala): la destra del soggetto è alla sinistra di chi guarda. In arancio il canale fino all'intestino tenue, in viola l'intestino crasso; le ghiandole annesse sono le ghiandole salivari (qui parotidi e sottomandibolari; le sottolinguali sono sotto la lingua), il fegato con la cistifellea e il pancreas, che si trova dietro lo stomaco. La linea tratteggiata è il diaframma.

Il fegato occupa la parte alta destra dell'addome, subito sotto il diaframma; lo stomaco è a sinistra; il pancreas si allunga dietro lo stomaco, con la testa accolta nella curva a C del duodeno. Le anse del tenue riempiono il centro dell'addome, incorniciate dal colon. Le funzioni dell'apparato sono sei: *ingestione* del cibo, *secrezione* di acqua, acido, enzimi e muco, *motilità* (mescolamento e avanzamento), *digestione* meccanica e chimica, *assorbimento* e *eliminazione* dei residui con le feci. Un'osservazione utile: il lume del tubo è, in senso stretto, ancora «fuori» dal corpo, come l'interno di una ciambella. Una sostanza entra davvero nell'organismo solo quando attraversa l'epitelio.

8.2.2 La parete del canale alimentare

Dall'esofago all'ano la parete ha lo stesso schema, formato da quattro strati, o *tonache* (Figura 8.2). Dal lume verso l'esterno:

- la **mucosa**: un epitelio, una lamina propria di connettivo lasso con capillari e tessuto linfatico, e un sottile strato di muscolo liscio, la muscolare della mucosa. L'epitelio è pavimentoso pluristratificato dove serve resistere all'attrito (bocca, esofago, ano) e cilindrico semplice dove si secerne e si assorbe (stomaco e intestino), come hai visto studiando i tessuti (*Scienze naturali 3*, cap. 14);
- la **sottomucosa**: connettivo più denso, con vasi sanguigni e linfatici e una rete di neuroni, il plesso sottomucoso, che controlla le secrezioni;
- la **muscolare**: muscolo liscio in due strati, uno interno a fibre circolari, che stringe il tubo, e uno esterno a fibre longitudinali, che lo accorcia; fra i due c'è il plesso mienterico, che ne coordina i movimenti. Nello stomaco si aggiunge uno strato obliquo. Nella bocca, nella faringe, nel primo tratto dell'esofago e nello sfintere esterno dell'ano il muscolo è invece scheletrico, e per questo deglutizione e defecazione hanno una parte volontaria;
- la **sierosa**: una membrana sottile che fa parte del peritoneo, il foglietto che riveste gli organi dell'addome; l'esofago, nel torace, ne è privo ed è avvolto da connettivo.

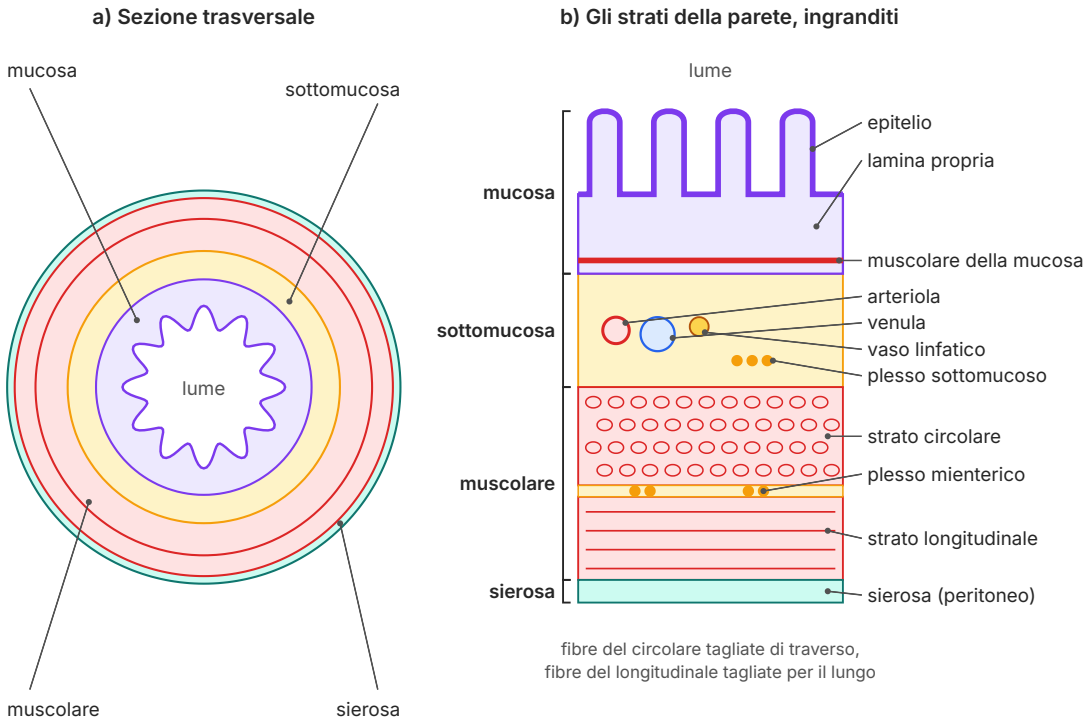


Figura 8.2 La parete del canale alimentare (schema non in scala). a) Una sezione trasversale dell'intestino con le quattro tonache. b) Un tratto di parete ingrandito, con il lume in alto: le sporgenze della mucosa sono i villi dell'intestino tenue. I due plessi nervosi appartengono al sistema nervoso enterico.

I plessi sottomucoso e mienterico formano il **sistema nervoso enterico**, circa cento milioni di neuroni che possono regolare movimenti e secrezioni anche da soli, ma ricevono comandi dal sistema nervoso autonomo (vedi cap. 14).

8.2.3 Peristalsi e sfinteri

Il cibo non scende per gravità. Lo spinge la **peristalsi**, un'onda di contrazione della muscolatura circolare che si propaga lungo il tubo: il tratto subito dietro il contenuto si stringe, quello davanti si rilassa, e il contenuto avanza. Per questo si riesce a deglutire anche a testa in giù. Nell'intestino tenue prevalgono le contrazioni di *segmentazione*, che rimescolano il contenuto avanti e indietro mettendolo in contatto con la parete.

In alcuni punti lo strato circolare si ispessisce e forma uno **sfintere**, un anello che, contratto, chiude il passaggio e regola il flusso in una sola direzione. I principali sono lo sfintere esofageo superiore, il **cardias** (fra esofago e stomaco), il **piloro** (fra stomaco e duodeno), la **valvola ileocecale** (fra ileo e cieco) e i due sfinteri anali: l'interno, di muscolo liscio e involontario, e l'esterno, scheletrico e volontario.

8.3 La digestione, tratto per tratto

8.3.1 La bocca e la deglutizione

La digestione comincia in bocca, in due modi. Quella **meccanica** riduce il cibo in frammenti: i denti lo tagliano e lo triturano, la lingua lo rimescola. Quella **chimica** ne idrolizza le molecole grazie agli enzimi. La dentatura permanente dell'adulto ha 32 denti: 8 incisivi, che tagliano, 4 canini, che strappano, 8 premolari e 12 molari, che macinano (compresi i quattro «denti del giudizio»); quella da latte ne ha 20. Lo smalto della corona, fatto soprattutto di idrossiapatite, un fosfato di calcio, è il materiale più duro del corpo.

Tre paia di ghiandole salivari, le parotidi, le sottomandibolari e le sottolinguali, producono ogni giorno circa 1–1,5 L di saliva. È soprattutto acqua, con muco che lubrifica, ioni bicarbonato che tamponano gli acidi, il lisozima, un enzima che attacca la parete di alcuni batteri, e l'**amilasi salivare**, che comincia a idrolizzare l'amido in maltosio e in brevi catene di glucosio, le destrine. Prova a masticare a lungo un pezzo di pane: diventa dolce.

La lingua impasta il cibo con la saliva e lo raccoglie in un **bolo**, che spinge verso la faringe. Fin qui la deglutizione è volontaria; da qui in avanti è un riflesso. Il palato molle si solleva e chiude il passaggio verso le cavità nasali; la laringe sale e l'**epiglottide** si ripiega sulla sua apertura, così che il bolo scivoli nell'esofago e non nelle vie respiratorie; il respiro si interrompe per un attimo. Poi la peristalsi porta il bolo lungo l'esofago, un tubo muscolare di circa 25 cm, in pochi secondi; il cardias si apre e il bolo entra nello stomaco.

8.3.2 Lo stomaco

Lo stomaco è la parte più larga del canale. Ha forma di J e si divide in cardias, fondo, corpo e antro, che termina al piloro; quando è vuoto la mucosa forma pieghe longitudinali, che si distendono quando si riempie. I tre strati muscolari rimescolano il contenuto con onde che lo impastano con il succo gastrico: il risultato è il **chimo**, una poltiglia semiliquida e acida. Il piloro lo lascia passare nel duodeno a piccole porzioni; di solito lo stomaco si svuota in 2–4 ore, più lentamente dopo un pasto ricco di grassi.

La mucosa gastrica è punteggiata da milioni di fossette, in fondo alle quali si aprono le **ghiandole gastriche**. Ognuna contiene cellule di tipi diversi (Figura 8.3), che insieme producono ogni giorno 2–3 L di succo gastrico:

- le **cellule mucose** della superficie e del colletto secernono muco e ioni bicarbonato;
- le **cellule parietali** secernono acido cloridrico e il *fattore intrinseco*, una proteina indispensabile per assorbire la vitamina B_{12} nell'ileo;
- le **cellule principali** secernono il *pepsinogeno*, la forma inattiva di un enzima;
- le **cellule G**, nelle ghiandole dell'antro, liberano nel sangue un ormone, la gastrina (vedi più avanti).

L'acido porta il pH del succo gastrico a valori intorno a 1,5–3,5 (sul pH vedi cap. 5). Svolge tre compiti: uccide gran parte dei microrganismi ingeriti, denatura le proteine srotolandole e rendendole più accessibili agli enzimi, e attiva il pepsinogeno. A pH basso il pepsinogeno perde un frammento e diventa **pepsina**, un enzima che spezza le proteine in polipeptidi più corti; la pepsina già formata attiva altro pepsinogeno, in una reazione che si autoalimenta. L'amilasi salivare, invece, smette di lavorare quando l'acido raggiunge il bolo. Lo stomaco assorbe poco: un po' d'acqua, alcuni ioni, l'alcol e alcuni farmaci, come l'acido acetilsalicilico.

Perché lo stomaco non digerisce sé stesso, se l'acido e la pepsina demoliscono le proteine e le sue cellule sono fatte di proteine? Per più ragioni insieme: uno strato di muco ricco di bicarbonato ricopre l'epitelio e lo mantiene vicino alla neutralità; le cellule epiteliali sono saldate fra loro da giunzioni strette, che impediscono all'acido di infiltrarsi; la pepsina è prodotta in forma inattiva e si attiva solo nel lume; infine l'epitelio si rinnova continuamente, e le cellule di superficie vengono sostituite in pochi giorni. Quando queste difese cedono si forma una lesione, l'ulcera.

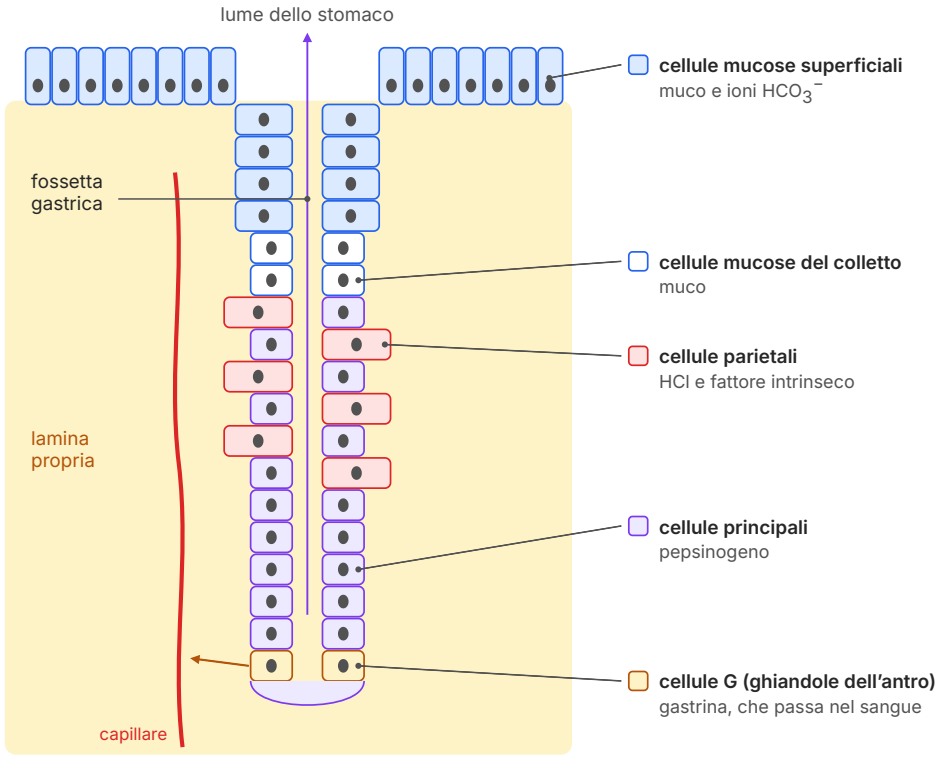


Figura 8.3 Una ghiandola gastrica (schema non in scala). Le cellule mucose rivestono la superficie e la fossetta; nella parte media prevalgono le cellule parietali, nel fondo le cellule principali. Le cellule G, qui disegnate alla base, si trovano nelle ghiandole dell'antro. Le frecce indicano dove vanno le secrezioni: nel lume o, per la gastrina, nel sangue.

COLLEGAMENTI

Educazione alla salute · Bocca e stomaco. La *carie* nasce quando i batteri della placca, come *Streptococcus mutans*, fermentano gli zuccheri e producono acidi che sciolgono l'idrossiapatite dello smalto; la prevengono lo spazzolino, il filo interdentale, pochi zuccheri fuori pasto e il fluoro, che rende lo smalto meno solubile negli acidi (sugli equilibri di solubilità vedi cap. 4). Nel *reflusso gastroesofageo* il cardias non chiude bene e l'acido risale nell'esofago, provocando bruciore. Per molto tempo si è pensato che l'*ulcera* gastrica e duodenale fosse dovuta soprattutto allo stress e all'eccesso di acido. Gli australiani Barry Marshall e Robin Warren mostrarono che nella maggior parte dei casi è legata all'infezione di un batterio, *Helicobacter pylori*, capace di vivere nel muco gastrico; Marshall arrivò a bere una coltura del batterio per dimostrarlo. Oggi l'ulcera da *H. pylori* si cura con antibiotici, prescritti dal medico, e la scoperta valse ai due il premio Nobel per la fisiologia o la medicina nel 2005. Anche alcuni farmaci antinfiammatori, usati a lungo, danneggiano la mucosa: i farmaci vanno presi solo come indicato dal medico o dal foglietto illustrativo.

8.3.3 Il duodeno: bile e succo pancreatico

Il chimo che entra nel duodeno è acido e contiene ancora quasi tutto l'amido, gran parte delle proteine e tutti i grassi da digerire. Nel duodeno, un tratto di circa 25 cm, arrivano due secrezioni attraverso un dotto comune che si apre nella parete. Il **succo pancreatico**, circa 1,2–1,5 L al giorno, contiene ioni bicarbonato, che neutralizzano l'acido del chimo, e quasi tutti gli enzimi della digestione: l'amilasi pancreatica per l'amido; la tripsina, la chimotripsina e la carbossipeptidasi per le proteine; la lipasi pancreatica per i trigliceridi; le nucleasi per gli acidi nucleici. Gli enzimi che digeriscono le proteine sono secreti inattivi, come il pepsinogeno: il tripsinogeno diventa tripsina nel duodeno grazie a un enzima della mucosa, l'enteropeptidasi, e la tripsina attiva poi gli altri.

La **bile** è prodotta dal fegato, circa 0,8–1 L al giorno, e fra un pasto e l'altro è immagazzinata e concentrata nella cistifellea, che la spreme nel duodeno quando arrivano i grassi. Contiene acqua, ioni, colesterolo, fosfolipidi, pigmenti come la bilirubina, che deriva dalla demolizione dell'emoglobina e i cui derivati danno il colore alle feci, e soprattutto i **sali biliari**. Questi hanno una parte idrofila e una idrofoba, come i detergenti: si dispongono sulla superficie delle gocce di grasso e le spezzano in goccioline sempre più piccole. È l'*emulsione*, che non rompe nessun legame ma moltiplica la superficie su cui la lipasi, idrosolubile, può lavorare.

L'ultimo passaggio della digestione non avviene nel lume. Gli enzimi del pancreas lasciano disaccaridi, peptidi brevi e nucleotidi; a scinderli sono enzimi fissati sulla membrana delle cellule dell'epitelio intestinale, nel loro **orletto a spazzola** (vedi la sezione successiva): la maltasi, la saccarasi e la lattasi idrolizzano i disaccaridi maltosio, saccarosio e lattosio; le peptidasi liberano gli amminoacidi; nucleosidasi e fosfatasi scompongono i nucleotidi. La Tabella 8.2 e la Figura 8.4 riassumono il percorso di ogni macronutriente.

COLLEGAMENTI

Chimica · Ogni enzima ha il suo pH. Gli enzimi digestivi lavorano in ambienti molto diversi: la pepsina ha la massima attività a pH intorno a 2, la tripsina intorno a 8. Lontano dal pH ottimale la forma del sito attivo cambia e l'enzima rallenta o si inattiva: per questo l'amilasi salivare si ferma nello stomaco e la pepsina smette di agire nel duodeno, dove il bicarbonato ha neutralizzato l'acido (sul pH vedi cap. 5, sui catalizzatori cap. 4).

Greco · idrolisi, da ὕδωρ «acqua» e λύσις «scioglimento»: la scissione di un legame con l'aiuto di una molecola d'acqua, il lavoro di tutti gli enzimi digestivi.

Tabella 8.2 I principali enzimi digestivi.

Dove agisce	Enzima (chi lo produce)	Substrato	Prodotti
bocca	amilasi salivare (ghiandole salivari)	amido	maltosio, destrine
stomaco	pepsina (cellule principali, come pepsinogeno)	proteine	polipeptidi
duodeno	amilasi pancreatica (pancreas)	amido, destrine	maltosio
duodeno	tripsina, chimotripsina, carbossipeptidasi (pancreas)	proteine, polipeptidi	peptidi brevi, amminoacidi
duodeno	lipasi pancreatica (pancreas)	trigliceridi emulsionati	acidi grassi, monogliceridi
duodeno	nucleasi (pancreas)	DNA, RNA	nucleotidi
orletto a spazzola	maltasi, saccarasi, lattasi (enterociti)	maltosio, saccarosio, lattosio	glucosio, fruttosio, galattosio
orletto a spazzola	peptidasi (enterociti)	peptidi brevi	amminoacidi
orletto a spazzola	nucleosidasi, fosfatasi (enterociti)	nucleotidi	basi azotate, pentosi, fosfato

ERRORE FREQUENTE

«La bile è un enzima che digerisce i grassi». No: la bile non contiene enzimi digestivi. I sali biliari emulsionano i grassi, un'azione fisica simile a quella del sapone sull'olio; a idrolizzare i trigliceridi è la lipasi pancreatica. Allo stesso modo non è vero che «lo stomaco assorbe gran parte dei nutrienti»: quasi tutto l'assorbimento avviene nell'intestino tenue.

APPROFONDIMENTO

Approfondimento · Spallanzani e il succo gastrico

Nel Settecento ci si chiedeva se lo stomaco digerisse il cibo macinandolo, come una macina da mulino, o sciogliendolo con un liquido. Lazzaro Spallanzani (1729–1799), nato a Scandiano, vicino a Reggio Emilia, e professore di storia naturale a Pavia, affrontò la questione con esperimenti su molti animali e su sé stesso. Inghiottì piccoli sacchetti di tela e tubetti di legno forati pieni di carne e pane, e li recuperò dopo alcune ore: il contenuto, protetto da ogni azione meccanica, era in parte disciolto. Raccolse poi il succo gastrico di animali e vi immerse pezzetti di carne in recipienti tenuti al caldo: la carne si dissolveva anche fuori dal corpo, più in fretta alla temperatura corporea che al freddo.

Le sue conclusioni, che la digestione gastrica è opera di un liquido e che quel liquido agisce anche in provetta, aprirono la strada allo studio chimico della digestione: nel secolo successivo si sarebbero scoperti l'acido dello stomaco e la pepsina. Spallanzani è ricordato anche per gli esperimenti contro la generazione spontanea e per gli studi sulla riproduzione e sull'orientamento dei pipistrelli.

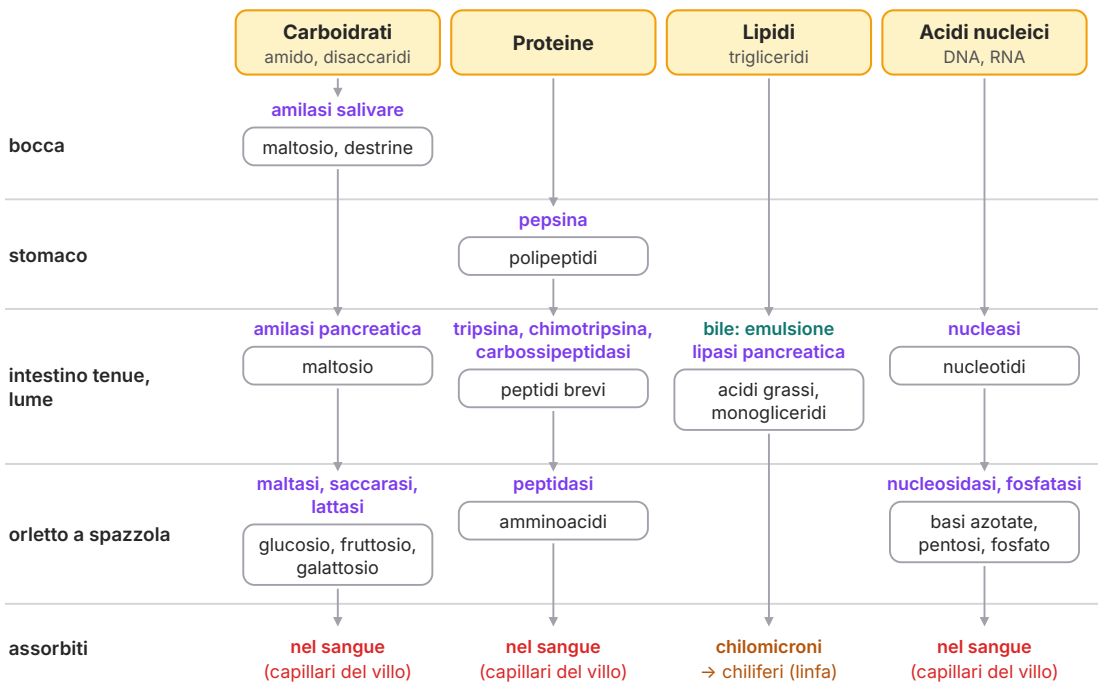


Figura 8.4 La digestione dei macronutrienti e degli acidi nucleici (schema). In viola gli enzimi, nei riquadri i prodotti; la bile (in verde acqua) emulsiona i grassi ma non è un enzima. In basso la via che i prodotti prendono dopo l'assorbimento: i capillari del sangue o, per i lipidi ricomposti in chilomicroni nell'enterocita, i chiliferi della linfa.

ESPERIENZA DI LABORATORIO

L'amilasi al lavoro: temperatura e pH

Obiettivo. Verificare che l'amilasi idrolizza l'amido e che la sua attività dipende dalla temperatura e dal pH.

Materiali. Soluzione di amido all'1 %, soluzione di amilasi commerciale (preparata dal docente), soluzione di Lugol (iodio-ioduro di potassio), aceto, provette, una piastra a pozzetti bianca, contagocce, bagnomaria a 37 °C, ghiaccio, cronometro.

Procedimento. Metti una goccia di Lugol in ogni pozzetto della piastra. Prepara cinque provette con 5 mL di amido ciascuna: A in ghiaccio, B a temperatura ambiente, C a 37 °C, D a 37 °C con amilasi fatta bollire per cinque minuti e poi raffreddata (preparata dal docente), E a 37 °C con 1 mL di aceto. Dopo qualche minuto di equilibrio aggiungi a ogni provetta 1 mL di amilasi e fai partire il cronometro. Ogni minuto preleva una goccia da ogni provetta e mettila su un pozzetto con il Lugol: l'amido dà un colore blu-nero, e quando non ce n'è più la goccia resta giallo-arancio. Annota il tempo dopo cui il colore blu-nero non compare più.

Sicurezza. Occhiali e guanti; il Lugol macchia e irrita: evita il contatto con pelle e occhi. Non inalare la polvere di enzima, che può provocare allergie: le soluzioni le prepara il docente. Le soluzioni usate, molto diluite, si eliminano nel lavandino con abbondante acqua. Niente cibo né bevande in laboratorio.

Risultati attesi. Il colore blu-nero scompare prima nelle provette a temperatura più alta e a pH neutro; nella provetta con l'enzima bollito (denaturato) resta, e così in quella acidificata, più a lungo o fino alla fine. La temperatura ottimale precisa dipende dall'origine dell'enzima, riportata sulla sua scheda.

Domande. 1) Quale provetta fa da controllo per dimostrare che è l'enzima, e non il tempo, a far sparire l'amido? 2) Che cosa accadrebbe all'amilasi salivare nello stomaco? 3) Come verificheresti che fra i prodotti ci sono zuccheri riducenti?

8.4 L'assorbimento e l'intestino crasso

8.4.1 Una superficie moltiplicata

L'intestino tenue è lungo circa 3 m in una persona viva: il duodeno ne misura circa 25 cm, il digiuno circa 1 m e l'ileo il resto. È il luogo dove la digestione si completa e dove si assorbe quasi tutto. Per farlo serve una superficie enorme, ottenuta con tre livelli di ripiegamento. La mucosa e la sottomucosa formano pieghe permanenti, le **pliche circolari**; le pliche sono coperte di **villi**, estroflessioni della mucosa a forma di dito alte circa 0,5–1 mm, ciascuna con una rete di capillari e un capillare linfatico al centro; e ogni cellula dell'epitelio dei villi, l'*enterocita*, porta sulla membrana rivolta verso il lume migliaia di **microvilli**, sottili sporgenze lunghe circa 1 µm che nell'insieme formano l'orletto a spazzola (Figura 8.5).

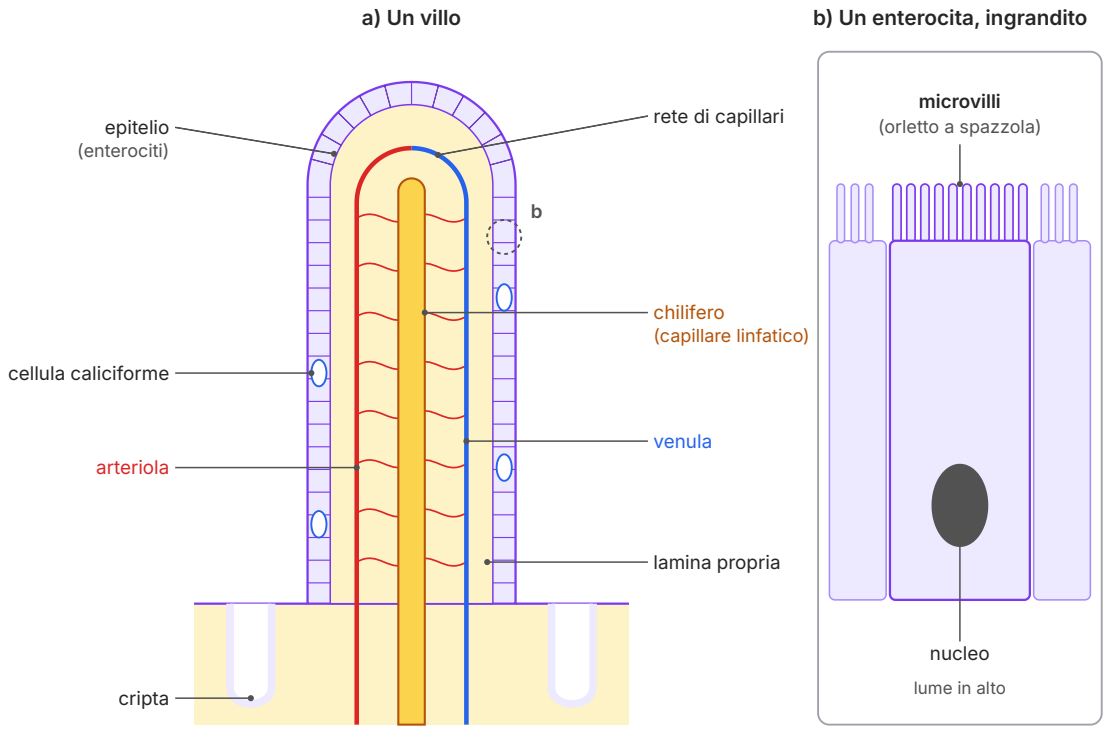


Figura 8.5 Un villo intestinale (schema non in scala; un villo è alto circa 0,5–1 mm, un microvillo è lungo circa 1 µm). L'epitelio è formato da enterociti e da cellule caliciformi, che producono muco. Al centro del villo c'è il chilifero, un capillare linfatico a fondo cieco, circondato da una rete di capillari sanguigni che parte da un'arteriola e confluisce in una venula. Fra i villi si aprono le cripte, dove nascono le nuove cellule. A destra, un enterocita ingrandito con i microvilli dell'orletto a spazzola.

Quanto è grande, alla fine, la superficie interna dell'intestino? Una misura accurata (Helander e Fändriks, 2014) ha stimato per l'intero tubo digerente circa 30 m^2, quasi tutti nell'intestino tenue: più o meno il pavimento di un monolocale. Molti libri riportano ancora cifre molto più alte, paragonate a un campo da tennis, che derivano da stime più vecchie e meno precise. Anche 30 m^2, comunque, sono circa quindici volte la superficie della pelle. Alla base dei villi le **cripte** producono continuamente nuove cellule, che risalgono lungo il villo e si staccano in cima dopo pochi giorni.

ERRORE FREQUENTE

Villi e microvilli sono la stessa cosa, in grande e in piccolo. No. Un villo è una struttura pluricellulare della mucosa, visibile con una lente, che contiene vasi sanguigni e un chilifero. Un microvillo è una sporgenza della membrana di una sola cellula, mille volte più piccola, visibile solo al microscopio elettronico. Ogni villo è rivestito da migliaia di cellule, e ogni cellula porta migliaia di microvilli.

8.4.2 Due vie: il sangue e la linfa

I prodotti della digestione attraversano gli enterociti con meccanismi diversi, gli stessi che hai studiato per la membrana cellulare (*Scienze naturali 2*, cap. 4). Glucosio e galattosio entrano per trasporto attivo, insieme agli ioni sodio; il fruttosio per diffusione facilitata; gli amminoacidi e i peptidi molto brevi per trasporto attivo. L'acqua li segue per osmosi. Dall'altro lato della cellula queste sostanze passano nei capillari del villo, poi nelle venule e infine nella vena porta epatica, che le porta direttamente al fegato prima che raggiungano il resto del corpo.

I lipidi prendono un'altra strada. Acidi grassi e monogliceridi, insolubili in acqua, sono accompagnati fino all'orletto a spazzola dai sali biliari, che li avvolgono in piccoli aggregati, le micelle; essendo liposolubili, attraversano la membrana. Dentro l'enterocita vengono ricomposti in trigliceridi, che con colesterolo, fosfolipidi e proteine sono impacchettati in grosse particelle, i **chilomicroni**. I chilomicroni sono troppo grandi per entrare nei capillari sanguigni ed entrano invece nel **chilifero**, il capillare linfatico del villo. La linfa che li trasporta, lattiginosa dopo un pasto grasso, risale per i vasi linfatici e si versa nel sangue in una grande vena alla base del collo (vedi cap. 11). Con i grassi viaggiano le vitamine liposolubili: per questo chi non assorbe bene i grassi rischia anche carenze di vitamine A, D, E e K.

Ogni giorno entrano nell'intestino tenue circa 9 L d'acqua: un paio con le bevande e gli alimenti, il resto con saliva, succo gastrico, bile, succo pancreatico e secrezioni intestinali. Il tenue ne riassorbe circa 8 L, il crasso poco meno di 1 L, e con le feci se ne perde solo un decimo di litro circa. Se un'infezione accelera il transito il bilancio si rompe, e la diarrea grave disidrata in fretta, soprattutto i bambini piccoli.

8.4.3 L'intestino crasso e il microbiota

L'intestino crasso, lungo circa 1,5 m, inizia con il **cieco**, un sacco a fondo cieco da cui pende l'**appendice**, sale sul lato destro come colon ascendente, attraversa l'addome sotto lo stomaco come colon trasverso, scende a sinistra come colon discendente, forma la curva del colon sigmoideo e termina con il **retto** e il canale anale (Figura 8.1). La sua mucosa non ha villi e possiede moltissime cellule caliciformi, il cui muco lubrifica il contenuto. Il crasso riassorbe acqua e ioni e trasforma i residui in *feci*, fatte di acqua, fibra non digerita, batteri, cellule desquamate e

pigmenti derivati dalla bile. Quando le feci distendono il retto si attiva il riflesso della defecazione: lo sfintere interno si rilassa da solo, quello esterno è controllato volontariamente.

Il crasso ospita la comunità più numerosa di microrganismi del corpo, il **microbiota** intestinale, fatto soprattutto di batteri. Una stima accurata (Sender, Fuchs e Milo, 2016) conta in un adulto circa 4×10^{13} batteri, un numero dello stesso ordine di grandezza delle cellule umane: non dieci volte tanto, come si leggeva un tempo. Il microbiota fermenta la fibra producendo acidi grassi a catena corta, che nutrono le cellule del colon, e gas; sintetizza la vitamina K e alcune vitamine del gruppo B; occupa lo spazio e le risorse che altrimenti userebbero i batteri patogeni. Un ciclo di antibiotici può alterarlo per qualche tempo (sugli antibiotici vedi *Scienze naturali 3*, cap. 13).

8.5 Fegato, pancreas e regolazione della digestione

8.5.1 Il fegato e il circolo portale

Il fegato è il più grande organo interno del corpo: in un adulto pesa circa 1,4 kg. È formato da lobuli, nei quali file di cellule, gli *epatociti*, sono separate da capillari larghi e permeabili, i sinusoidi. Riceve sangue da due vasi (Figura 8.6). L'**arteria epatica**, che nasce dall'aorta attraverso il tronco celiaco, porta sangue ricco di ossigeno, circa un quarto del totale. Gli altri tre quarti arrivano dalla **vena porta epatica**, che raccoglie il sangue venoso di stomaco, intestino, pancreas e milza, ricco dei nutrienti appena assorbiti. Il sangue di entrambi i vasi si mescola nei sinusoidi, scorre fra gli epatociti ed esce dalle vene epatiche, che lo versano nella vena cava inferiore e quindi al cuore.

Una vena che porta il sangue da una rete di capillari a una seconda rete di capillari, invece che al cuore, forma un **sistema portale**. Il vantaggio è evidente: tutto ciò che si assorbe dall'intestino, nutrienti ma anche farmaci, alcol e sostanze tossiche, passa prima dal fegato, che lo può immagazzinare, trasformare o eliminare. Le funzioni del fegato sono moltissime; le principali sono:

- produce la **bile**, ed elimina con essa la bilirubina e il colesterolo in eccesso;
- conserva il glucosio sotto forma di **glicogeno** dopo i pasti e lo libera nei periodi di digiuno, contribuendo a mantenere costante la glicemia (vedi cap. 13);
- sintetizza le principali **proteine del plasma**, come l'albumina, il fibrinogeno e altri fattori della coagulazione (vedi cap. 10), e le lipoproteine che trasportano i lipidi;
- rimuove il gruppo amminico dagli amminoacidi in eccesso e trasforma l'ammoniaca che ne risulta, molto tossica, in **urea**, che i reni poi eliminano (vedi cap. 12);
- **inattiva** farmaci, ormoni e sostanze estranee, fra cui l'alcol;
- **immagazzina** ferro e le vitamine A, D e B_{12}; i suoi macrofagi eliminano i globuli rossi invecchiati e i batteri arrivati con il sangue portale.

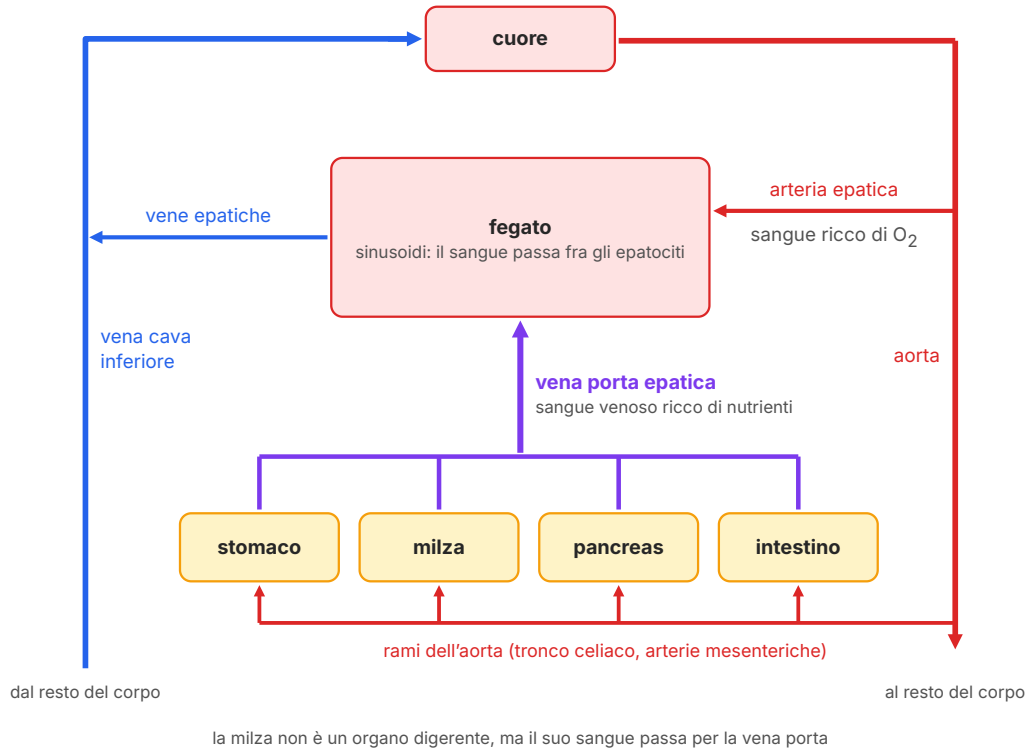


Figura 8.6 Il circolo portale epatico (schema). Il sangue venoso che lascia stomaco, intestino, pancreas e milza non torna direttamente al cuore: la vena porta epatica lo porta prima ai sinusoidi del fegato, dove arriva anche il sangue ossigenato dell'arteria epatica. In rosso il sangue ricco di ossigeno, in blu quello povero, in viola il sangue portale.

L'alcol etilico assunto con le bevande è ossidato soprattutto nel fegato: l'etanolo diventa acetaldeide (etanale), una sostanza tossica, e poi acido acetico, secondo le ossidazioni degli alcoli descritte nel cap. 7. Il fegato ne smaltisce una quantità limitata ogni ora, e non si può accelerare: il caffè o una doccia fredda non abbassano l'alcolemia.

8.5.2 Il pancreas esocrino

Il pancreas è una ghiandola allungata, lunga 12–15 cm, posta dietro lo stomaco, con la testa nella curva del duodeno e la coda verso la milza (Figura 8.1). È una ghiandola doppia. Circa il 99 % delle sue cellule è raccolto in piccoli grappoli, gli *acini*, che producono il succo pancreatico: questa è la parte esocrina, quella della digestione. Sparse fra gli acini ci sono le isole di Langerhans, che liberano nel sangue insulina e glucagone: la parte endocrina, che studierai nel cap. 13.

8.5.3 La regolazione: nervi e ormoni

Le secrezioni digestive non scorrono di continuo: partono quando servono, in tre fasi che si sovrappongono. Nella **fase cefalica** la vista, l'odore o anche solo il pensiero del cibo attivano, attraverso il nervo vago, la salivazione e la secrezione gastrica: lo stomaco si prepara prima che il cibo arrivi. Nella **fase gastrica** la distensione dello stomaco e i peptidi del cibo stimolano le cellule G a liberare la **gastrina**, che arriva con il sangue alle ghiandole gastriche e aumenta la secrezione di acido e i movimenti dello stomaco. Nella **fase intestinale** l'arrivo del chimo nel duodeno fa liberare dalla mucosa duodenale due ormoni, che regolano il pancreas e la cistifellea e rallentano lo svuotamento dello stomaco, così che il duodeno non riceva più chimo di quanto possa trattare.

Il primo dei due fu scoperto nel 1902 da William Bayliss ed Ernest Starling, a Londra. In un cane avevano osservato che l'acido introdotto nell'intestino faceva secernere il pancreas anche dopo aver tagliato i nervi dell'ansa intestinale. Prepararono allora un estratto della mucosa e lo iniettarono nel sangue: il pancreas secerneva. Il segnale, dunque, viaggiava con il sangue. Chiamarono questa sostanza **secretina**: fu il primo ormone riconosciuto come tale (sugli ormoni vedi cap. 13). La secretina è liberata quando il chimo acido arriva nel duodeno e stimola il pancreas a secernere un succo ricco di bicarbonato; quando l'acido è neutralizzato lo stimolo cessa, un esempio di feedback negativo. L'altro ormone, la **colecistochinina** (CCK), è liberato quando nel duodeno arrivano grassi e amminoacidi: fa contrarre la cistifellea, stimola il pancreas a produrre enzimi e contribuisce al senso di sazietà.

COLLEGAMENTI

Educazione alla salute · Intestino e fegato. La *celiachia* è una reazione autoimmune scatenata dal glutine, una miscela di proteine di frumento, orzo e segale, in persone geneticamente predisposte: la mucosa del tenue si infiamma e i villi si appiattiscono, riducendo l'assorbimento (sulle malattie autoimmuni vedi cap. 11). Si diagnostica con esami del sangue e, di solito, con una biopsia della mucosa, e si cura con una dieta senza glutine per tutta la vita; il glutine non va eliminato prima degli esami, che altrimenti risultano falsamente negativi. L'*intolleranza al lattosio* è tutt'altra cosa: in molti adulti la produzione di lattasi diminuisce dopo l'infanzia, e il lattosio non digerito, fermentato nel colon, provoca gonfiore e diarrea; non è un'allergia e non danneggia l'intestino. L'*alcol*, infine, è una sostanza tossica per il fegato: l'abuso porta all'accumulo di grasso negli epatociti (steatosi), all'epatite alcolica e alla cirrosi, in cui il tessuto funzionante è sostituito da tessuto cicatriziale. In Italia la vendita di alcolici ai minori di 18 anni è vietata. Per il tumore del colon-retto, uno dei più frequenti negli adulti, le Regioni offrono programmi di *screening* gratuiti, con la ricerca del sangue occulto nelle feci ogni due anni, di norma fra i 50 e i 69 anni (in alcune Regioni fino ai 74).

SINTESI

- I nutrienti sono carboidrati, lipidi e proteine (macronutrienti), vitamine e sali minerali (micronutrienti) e acqua; nove amminoacidi e due acidi grassi sono essenziali.
- Le etichette UE calcolano l'energia con fattori fissi: 17 kJ/g per carboidrati e proteine, 37 per i grassi, 29 per l'alcol, 8 per le fibre.
- Il fabbisogno energetico è il metabolismo basale più l'attività fisica, la digestione e la crescita; la dieta mediterranea (UNESCO, 2010) è un modello di dieta varia ed equilibrata.
- L'apparato digerente è un canale dalla bocca all'ano con ghiandole annesse (salivari, fegato, pancreas); la parete ha quattro tonache: mucosa, sottomucosa, muscolare, sierosa.
- La peristalsi fa avanzare il contenuto; gli sfinteri (cardias, piloro, valvola ileocecale, sfinteri anali) ne regolano il passaggio.
- In bocca l'amilasi salivare inizia la digestione dell'amido; la deglutizione è prima volontaria e poi riflessa, con l'epiglottide che chiude la laringe.
- Nello stomaco le cellule parietali secernono HCl (pH 1,5–3,5) e le principali pepsinogeno, attivato in pepsina; muco, bicarbonato e rinnovo dell'epitelio proteggono la mucosa.
- Nel duodeno il succo pancreatico neutralizza l'acido e fornisce amilasi, proteasi, lipasi e nucleasi; la bile emulsiona i grassi senza essere un enzima; gli enzimi dell'orletto a spazzola completano la digestione.
- Pliche, villi e microvilli danno al tenue una superficie di circa 30 m^2; zuccheri e amminoacidi passano nel sangue e nella vena porta, i lipidi come chilomicroni nei chiliferi e nella linfa.
- Il crasso riassorbe acqua e ospita il microbiota, che fermenta la fibra e produce vitamina K.
- Il fegato, raggiunto dal sangue portale, produce bile e proteine del plasma, conserva glicogeno, forma l'urea e inattiva farmaci e alcol; il pancreas esocrino produce il succo pancreatico.
- Nervi (fase cefalica) e ormoni (gastrina, secretina, colecistochinina) regolano le secrezioni; la secretina, scoperta da Bayliss e Starling nel 1902, fu il primo ormone conosciuto.

ESERCIZI

Comprendere e ricordare

1. ● Quale di questi nutrienti **non** fornisce energia al corpo?
   - **A.** le proteine
   - **B.** le vitamine
   - **C.** i lipidi
   - **D.** i carboidrati

2. ● Quale fra queste vitamine è liposolubile?

   A. la vitamina C
   B. la vitamina B_{12}
   C. la vitamina B_1
   D. la vitamina K

3. ● Quanti denti ha la dentatura permanente completa di un adulto?

   A. 20
   B. 28
   C. 32
   D. 36

4. ● Il pepsinogeno è prodotto:

   A. dalle cellule principali delle ghiandole gastriche
   B. dalle cellule parietali delle ghiandole gastriche
   C. dal pancreas
   D. dal fegato

5. ●● Quale affermazione sulla bile è corretta?

   A. contiene la lipasi che idrolizza i trigliceridi
   B. è prodotta dalla cistifellea
   C. digerisce le proteine nel duodeno
   D. emulsiona i grassi grazie ai sali biliari

6. ●● Nel chilifero di un villo entrano soprattutto:

   A. glucosio e galattosio
   B. chilomicroni
   C. amminoacidi
   D. ioni sodio

7. ●● La vena porta epatica:

   A. porta il sangue dal fegato alla vena cava inferiore
   B. è un ramo dell'aorta e porta sangue ricco di ossigeno
   C. porta al fegato il sangue venoso di stomaco, intestino, pancreas e milza
   D. porta il sangue dal fegato all'intestino

8. ●● La secretina viene liberata nel sangue quando:

   A. il chimo acido arriva nel duodeno
   B. il cibo è ancora in bocca
   C. lo stomaco si distende
   D. i grassi arrivano nel colon

9. ●●● Una persona con intolleranza al lattosio produce poca:
   - **A.** amilasi pancreatica
   - **B.** pepsina
   - **C.** bile
   - **D.** lattasi dell'orletto a spazzola

Vero o falso

10. ● Lo stomaco assorbe la maggior parte dei nutrienti.

11. ● La fibra alimentare non è idrolizzata dai nostri enzimi, ma in parte è fermentata dai batteri del colon.

12. ●● L'amilasi salivare continua a idrolizzare l'amido per ore nel contenuto acido dello stomaco.

13. ● La bile è prodotta dal fegato e la cistifellea la immagazzina e la concentra.

14. ●● In una figura dell'addome in visione anteriore il fegato appare alla sinistra di chi guarda.

15. ●●● I microvilli sono piccoli villi formati da poche cellule.

Applicare

16. ● L'etichetta di un pacchetto di biscotti (valori di esempio) riporta per 100 g: grassi 18,0 g, carboidrati 68,0 g, fibre 3,0 g, proteine 7,0 g. Calcola l'energia per 100 g in kJ e in kcal con i fattori della Tabella 8.1.

17. ●● Con i dati dell'esercizio precedente calcola l'energia di una porzione di 25 g di biscotti e la percentuale dell'energia che viene dai grassi.

18. ●● Un bicchiere contiene 150 mL di vino al 12 % V/V di etanolo. Sapendo che la densità dell'etanolo è 0,79 g/mL, calcola la massa di etanolo e l'energia che fornisce (29 kJ/g).

19. ●● Una dieta fornisce $8{,}40 \times 10^3$ kJ al giorno: il 15 % dell'energia viene dalle proteine e il 30 % dai grassi. Quanti grammi di proteine e quanti di grassi contiene?

20. ● Ogni giorno entrano nell'intestino tenue 9,0 L d'acqua; il tenue ne riassorbe 8,1 L e con le feci se ne eliminano 0,10 L. Quanti litri riassorbe il crasso? Che percentuale dei 9,0 L riassorbono il tenue e il crasso?

21. ●● Il chimo nello stomaco ha pH 2,0; nel duodeno, dopo l'arrivo del succo pancreatico, il contenuto ha pH 7,0. Di quale fattore è diminuita la concentrazione degli ioni H_3O^+? (Ricorda che $[H_3O^+] = 10^{-pH}$ mol/L; vedi cap. 5.)

22. ●●● Una colazione contiene pane (amido), burro (trigliceridi) e latte (lattosio e proteine). Per ciascuno dei quattro componenti indica, nell'ordine, gli enzimi che lo digeriscono e dove agiscono, i prodotti finali e la via che questi prendono dopo l'assorbimento (sangue o linfa).

Leggere dati e figure

Tabella 8.3 Tempo dopo il quale una goccia della miscela amido + amilasi non colora più di blu-nero il Lugol (dati di esempio di una classe, amilasi commerciale).

Provetta	Condizioni	Tempo (min)
A	in ghiaccio, circa 2 °C	oltre 30
B	temperatura ambiente, 20 °C	12
C	37 °C	5
D	37 °C, enzima bollito e raffreddato	oltre 30
E	37 °C, con aceto (pH circa 3)	oltre 30

Tabella 8.4 Glicemia (mg/dL) di due adulti a digiuno dopo aver bevuto una soluzione con 50 g di lattosio (dati di esempio).

Tempo (min)	0	30	60	90	120
persona P	85	125	135	115	95
persona Q	88	92	95	91	89

23. ●● La Tabella 8.3 riporta i risultati dell'esperienza sull'amilasi. a) In quali condizioni l'enzima lavora più in fretta? b) Perché nelle provette A, D ed E il colore blu-nero persiste, e in quale delle tre l'enzima potrebbe riprendere a funzionare se riportato a 37 °C e a pH neutro? c) La provetta D fa da controllo: che cosa dimostra? Quale altra provetta di controllo, del tutto priva di enzima, aggiungeresti?

24. ● Osserva la Figura 8.1. Elenca, nell'ordine in cui il cibo li attraversa, i tratti del canale alimentare dalla bocca all'ano, e indica quali organi della figura *non* sono attraversati dal cibo.

25. ●●● La Tabella 8.4 riporta la glicemia di due persone dopo una bevanda con 50 g di lattosio. a) Descrivi l'andamento nelle due persone. b) Quale delle due digerisce il lattosio, e perché la sua glicemia sale? c) Che cosa accade al lattosio nell'altra persona, e quali sintomi può avvertire? d) Perché un test come questo, da solo, non basta per una diagnosi?

Indagare e argomentare

26. ●● Spiega perché gli esperimenti di Spallanzani con i tubetti forati smentivano l'idea che la digestione nello stomaco fosse solo una macinazione, e perché l'esperimento con il succo gastrico in recipiente lo confermava. Quale prova di controllo avresti aggiunto?

27. ●●● Progetta un esperimento controllato per dimostrare che i sali biliari accelerano la digestione dei grassi del latte da parte della lipasi. Suggerimento: gli acidi grassi liberati abbassano il pH, e un indicatore come la fenolftaleina in un latte reso leggermente basico cambia colore quando il pH scende. Indica variabile indipendente, variabile dipendente, variabili controllate, controllo e norme di sicurezza.

28. ●●● Lo stomaco produce un acido forte e un enzima che digerisce le proteine, eppure non digerisce sé stesso. Spiega i meccanismi di protezione e, alla luce della scoperta di Marshall e Warren, perché oggi molte ulcere si curano con antibiotici. Concludi spiegando perché, invece, gli antibiotici non servono contro una gastroenterite virale.

PER APPROFONDIRE

- [TOR] G. J. Tortora, B. Derrickson, *Principles of Anatomy and Physiology*: il capitolo sull'apparato digerente, con tavole anatomiche dettagliate di ogni tratto.
- [SIL] D. U. Silverthorn, *Human Physiology*: il capitolo sulla digestione, per la regolazione nervosa e ormonale e per i meccanismi di trasporto dell'assorbimento.
- [CAM] L. A. Urry et al., *Campbell Biology*: il capitolo sulla nutrizione animale, che confronta l'apparato digerente umano con quello di altri animali.

Glossario del capitolo

Amminoacidi essenziali
I nove amminoacidi che le cellule umane non sintetizzano e che devono arrivare con la dieta.

Bile
Secrezione del fegato, conservata nella cistifellea, i cui sali biliari emulsionano i grassi; non contiene enzimi digestivi.

Bolo
Massa di cibo masticato e impastato con la saliva, pronta per la deglutizione.

Chilifero
Capillare linfatico a fondo cieco al centro di un villo, che raccoglie i chilomicroni.

Chilomicroni
Particelle di lipidi e proteine formate negli enterociti, che entrano nella linfa attraverso i chiliferi.

Chimo
Poltiglia semiliquida e acida formata nello stomaco dal cibo mescolato al succo gastrico.

Fibra alimentare
Insieme dei carboidrati vegetali, come la cellulosa, che gli enzimi umani non idrolizzano; in parte è fermentata dal microbiota del colon.

Metabolismo basale
Consumo di energia di una persona sveglia, a riposo, a digiuno e a temperatura confortevole, per le sole funzioni vitali.

Microbiota intestinale
Comunità di microrganismi, soprattutto batteri, dell'intestino crasso; fermenta la fibra e produce vitamina K.

Nutrienti
Sostanze degli alimenti che il corpo usa per ricavare energia, costruire i tessuti e regolare le proprie funzioni.

Orletto a spazzola
Insieme dei microvilli degli enterociti, sulla cui membrana si trovano gli enzimi che completano la digestione.

Pepsina
Enzima gastrico che idrolizza le proteine in polipeptidi; deriva dal pepsinogeno delle cellule principali, attivato dall'acido.

Peristalsi
Onda di contrazione della muscolatura circolare che si propaga lungo il canale alimentare e ne fa avanzare il contenuto.

Secretina
Ormone della mucosa duodenale, liberato all'arrivo del chimo acido, che fa secernere bicarbonato al pancreas; scoperto da Bayliss e Starling nel 1902.

Sfintere
Anello di muscolo che, contraendosi, chiude un passaggio del canale alimentare e ne regola il flusso (cardias, piloro, sfinteri anali).

Succo pancreatico
Secrezione esocrina del pancreas, ricca di bicarbonato e di enzimi digestivi.

Urea
Composto azotato poco tossico che il fegato forma dall'ammoniaca degli amminoacidi; i reni lo eliminano con l'urina.

Vena porta epatica
Vena che porta al fegato il sangue venoso di stomaco, intestino, pancreas e milza, ricco dei nutrienti assorbiti.

Villo
Estroflessione della mucosa dell'intestino tenue, alta circa 0,5–1 mm, con una rete di capillari e un chilifero.

Vitamine
Molecole organiche necessarie in piccole quantità, che non forniscono energia; si distinguono in idrosolubili (C, gruppo B) e liposolubili (A, D, E, K).

Soluzioni

1. B. Le vitamine regolano reazioni (molte sono precursori di coenzimi) ma non sono una fonte di energia.

2. D. Sono liposolubili le vitamine A, D, E e K; la C e quelle del gruppo B sono idrosolubili.

3. C. 8 incisivi + 4 canini + 8 premolari + 12 molari = 32; la dentatura da latte ne ha 20.

4. A. Le cellule principali secernono il pepsinogeno; le parietali l'acido cloridrico e il fattore intrinseco.

5. D. La bile è prodotta dal fegato (la cistifellea la conserva) e non contiene enzimi digestivi.

6. B. I lipidi assorbiti sono impacchettati in chilomicroni, troppo grandi per i capillari sanguigni; zuccheri, amminoacidi e ioni passano nel sangue.

7. C. È il vaso del sistema portale: porta al fegato il sangue venoso ricco di nutrienti.

8. A. L'acido del chimo nel duodeno stimola la liberazione di secretina, che fa secernere al pancreas un succo ricco di bicarbonato.

9. D. Manca o è scarsa la lattasi, l'enzima dell'orletto a spazzola che idrolizza il lattosio in glucosio e galattosio.

10. F. Lo stomaco assorbe solo un po' d'acqua, alcuni ioni, l'alcol e alcuni farmaci; quasi tutti i nutrienti si assorbono nell'intestino tenue.

11. V.

12. F. L'amilasi salivare si inattiva quando l'acido gastrico raggiunge il bolo; la digestione dell'amido riprende nel duodeno con l'amilasi pancreatica.

13. V.

14. V. In visione anteriore la destra del soggetto, dove si trova il fegato, è alla sinistra di chi guarda.

15. F. I microvilli sono sporgenze della membrana di una sola cellula, l'enterocita; i villi sono strutture pluricellulari della mucosa.

16. $E = 18{,}0 \cdot 37 + 68{,}0 \cdot 17 + 3{,}0 \cdot 8 + 7{,}0 \cdot 17 = 666 + 1156 + 24 + 119 = 1965$ kJ (circa $1{,}97 \times 10^3$ kJ); in kcal: $18{,}0 \cdot 9 + 68{,}0 \cdot 4 + 3{,}0 \cdot 2 + 7{,}0 \cdot 4 = 162 + 272 + 6 + 28 = 468$ kcal.

17. Porzione: 1965 kJ × 25/100 ≈ 491 kJ (circa $4{,}9 \times 10^2$ kJ). Grassi: 666/1965 = 0,339, cioè il 34 % dell'energia.

18. Volume di etanolo: 150 mL × 0,12 = 18 mL; massa: 18 mL × 0,79 g/mL ≈ 14 g (14,2 g); energia: 14,2 g × 29 kJ/g ≈ $4{,}1 \times 10^2$ kJ.

19. Proteine: 0,15 × 8400 kJ = 1260 kJ; 1260/17 ≈ 74 g. Grassi: 0,30 × 8400 kJ = 2520 kJ; 2520/37 ≈ 68 g.

20. Crasso: 9,0 − 8,1 − 0,10 ≈ 0,8 L. Tenue: 8,1/9,0 = 90 %; crasso: 0,8/9,0 ≈ 9 % (con le feci si perde circa l'1 %).

21. $[H_3O^+]$ passa da $10^{-2{,}0} = 1{,}0 \times 10^{-2}$ mol/L a $10^{-7{,}0} = 1{,}0 \times 10^{-7}$ mol/L: è diminuita di un fattore 10^5, cioè centomila volte.

22. Amido: amilasi salivare (bocca) e amilasi pancreatica (duodeno) → maltosio e destrine; maltasi dell'orletto a spazzola → glucosio → capillari del villo e vena porta. Lattosio: lattasi dell'orletto → glucosio e galattosio → sangue. Proteine: pepsina (stomaco) → polipeptidi; tripsina, chimotripsina, carbossipeptidasi (duodeno) → peptidi brevi; peptidasi dell'orletto → amminoacidi → sangue. Trigliceridi: emulsionati dalla bile, idrolizzati dalla lipasi pancreatica (duodeno) in acidi grassi e monogliceridi; nell'enterocita tornano trigliceridi e formano chilomicroni → chiliferi → linfa.

23. a) A 37 °C e pH neutro (provetta C, 5 min); a 20 °C più lentamente (12 min). b) In A il freddo rallenta moltissimo la reazione; in D l'enzima è denaturato dall'ebollizione; in E il pH acido lo inattiva. Riportato a 37 °C, l'enzima di A riprende a funzionare, perché il freddo non lo denatura; quello di D no (quello

di E potrebbe recuperare in parte, se l'acidità non lo ha denaturato in modo permanente). c) D dimostra che serve l'enzima attivo: con l'amilasi denaturata l'amido resta. Manca una provetta con amido e 1 mL d'acqua al posto dell'amilasi, a 37 °C, che esclude che l'amido scompaia da solo.

24. Bocca, faringe, esofago, stomaco, duodeno, digiuno e ileo (intestino tenue), cieco, colon ascendente, trasverso, discendente e sigmoideo, retto, ano. Non sono attraversati dal cibo: ghiandole salivari, fegato, cistifellea e pancreas (le ghiandole annesse), oltre all'appendice, che è un diverticolo laterale del cieco.

25. a) In P la glicemia sale di circa 50 mg/dL, con il massimo a 60 min, e poi torna verso il valore iniziale; in Q resta quasi costante (aumento di circa 7 mg/dL). b) P: la lattasi idrolizza il lattosio in glucosio e galattosio, che vengono assorbiti, e il glucosio fa salire la glicemia. c) In Q il lattosio non viene digerito né assorbito: arriva nel colon, dove i batteri lo fermentano producendo gas e richiamando acqua; può causare gonfiore, crampi e diarrea. d) La glicemia dipende anche da altri fattori (svuotamento gastrico, regolazione ormonale, errori di misura), e i sintomi possono avere altre cause: la diagnosi spetta al medico, che usa anche altri esami.

26. Traccia di risposta. Nei tubetti forati il cibo era protetto dalla macinazione ma raggiungibile dal liquido gastrico; se fosse digerito comunque, il responsabile doveva essere il liquido. Il succo gastrico in recipiente dimostrava che il liquido agisce anche senza lo stomaco e che la temperatura conta. Controllo: pezzi di carne uguali in acqua alla stessa temperatura, o tubetti sigillati che il liquido non può raggiungere.

27. Traccia di risposta. Variabile indipendente: presenza o assenza di sali biliari (o, in alternativa, di un detergente). Variabile dipendente: tempo necessario perché la fenolftaleina si decolori. Variabili controllate: volume e tipo di latte, quantità di carbonato di sodio, concentrazione e volume di lipasi, temperatura (per esempio 37 °C), volumi totali (si aggiunge acqua dove mancano i sali biliari). Controllo: latte con sali biliari ma senza lipasi (o con lipasi bollita). Più ripetizioni per ogni condizione. Sicurezza: occhiali e guanti, enzimi e sali preparati dal docente, nessun assaggio. Risultato atteso: con i sali biliari la decolorazione è più rapida perché l'emulsione aumenta la superficie dei grassi su cui agisce la lipasi.

28. Traccia di risposta. Protezioni: muco ricco di bicarbonato sopra l'epitelio, giunzioni strette fra le cellule, pepsina secreta come pepsinogeno inattivo e attivata solo nel lume, rapido rinnovo dell'epitelio. Marshall e Warren mostrarono che *Helicobacter pylori*, vivendo nel muco, danneggia queste difese e causa la maggior parte delle ulcere: eliminando il batterio con antibiotici prescritti dal medico l'ulcera guarisce e raramente ritorna. Gli antibiotici agiscono su strutture dei batteri (parete, ribosomi) che i virus non hanno: contro una gastroenterite virale sono inutili e favoriscono la resistenza.